Н. М. Слоним

АЛЮМИНИЕВЫЕ ПРОВОДА

ПРИ РЕМОНТЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ



Н. М. СЛОНИМ

АЛЮМИНИЕВЫЕ ПРОВОДА
ПРИ РЕМОНТЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ



«ЭНЕРГИЯ» · МОСКВА · 1973

6П2.1.06
С 48
УДК 621.315.67.333.04.69

Слоним Н. М.

С 48 Алюминиевые провода при ремонте асинхронных двигателей. М., «Энергия», 1973.

136 с. с ил.

В книге рассматриваются расчет и технология ремонта асинхронных электродвигателей мощностью до 100 кВт при применении алюминиевого обмоточного провода.

Приводится методика сокращенного поверочного расчета электродвигателя и его пересчета при ремонте с заменой медной обмотки статора на алюминиевую для случаев сохранения и изменения его параметров.

Освещаются технологические особенности ремонта, вызванные применением алюминиевого провода.

Книга предназначена для электрообмотчиков и инженерно-технических работников, занятых ремонтом электрических машин на специализированных электроремонтных заводах и в электроремонтных цехах промышленных предприятий и электростанций.

С $\frac{0339-169}{051(01)-73}$ 76-73 6П2.1.06

СЛОНИМ НИСИМ МОИСЕЕВИЧ

АЛЮМИНИЕВЫЕ ПРОВОДА ПРИ РЕМОНТЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Редактор Е. Л. Маршак
Редактор издательства Л. В. Копейкина
Обложка художника П. П. Перевалова
Технический редактор Л. В. Иванова
Корректор Н. В. Лобанова

Сдано в набор 1/XII 1972 г. Подписано к печати 23/V 1973 г. Т-08453
Формат 84×108 1/32 Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 7,14 Уч.-изд. л. 7,08
Тираж 9 000 экз. Зак. 1462 Цена 35 коп.

Издательство «Энергия». Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Осуществление грандиозных планов коммунистического строительства, намеченных XXIV съездом КПСС, дальнейшее развитие материально-технической базы коммунизма тесно связаны с непрерывным ростом электрификации и энерговооруженности народного хозяйства.

Непременным условием этого является непрерывный рост парка электрических машин в народном хозяйстве и в том числе наиболее распространенных из них — асинхронных электродвигателей мощностью 0,6—100 кВт, потребляющих до 40% электроэнергии, вырабатываемой в нашей стране. Высокая оснащенность электрооборудованием промышленных предприятий, электростанций, предприятий сельского хозяйства, транспорта требует от обслуживающего персонала умения не только правильно эксплуатировать электродвигатели, но технически грамотно их ремонтировать. Максимальное использование алюминия в электропромышленности при изготовлении и ремонте электрических машин имеет большое народнохозяйственное значение.

Благодаря достаточно хорошей электро- и теплопроводности, большой пластичности и малой плотности алюминий все шире применяется как заменитель меди для токоведущих частей машин и трансформаторов.

Плотность меди больше плотности алюминия в 3,3 раза, а проводимость лишь в 1,63 раза, поэтому алюминиевый провод такого же электрического сопротивления, как медный, легче его почти в 2 раза. Ремонт электродвигателей с обмоткой статора, выполненной из алюминиевого провода, имеет некоторые различия по сравнению с ремонтом электродвигателей с обмоткой из медного провода.

Основная технологическая особенность заключаетс в способах лужения и пайки проводов, учитывающи. специфическую особенность алюминия — быструю окисляемость в расплавленном состоянии и образование на

окисленной поверхности трещин и расслоений. В связи с этим считалось, что невозможно обеспечить надежность паяных соединений алюминиевых проводов. Это предубеждение долгое время ограничивало применение алюминиевых проводов при производстве электродвигателей и ремонте их обмоток.

С течением времени процессы лужения и пайки алюминиевых проводов совершенствовались и с достаточным основанием можно считать, что при применении надлежащих припоев и флюсов, а также при соблюдении разработанных технологических режимов паяное соединение алюминиевых проводов не уступает по надежности соединению медных проводов.

В настоящей работе приводится методика расчета и пересчета обмотки при ремонтах электродвигателей с алюминиевой обмоткой или при замене медной обмотки статора на алюминиевую для случаев сохранения и изменения его параметров; освещаются особенности технологии ремонта, вызванные применением алюминиевого провода.

Автор будет признателен всем, кто сочтет необходимым сообщить свои замечания и пожелания по данной книге. Замечания, отзывы и пожелания просьба посылать по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, изд-во «Энергия».

Автор

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Алюминий является самым распространенным металлом в земной коре и составляет 7,45% ее массы. Содержание алюминия в руде достигает 40—60%.

Для сравнения следует отметить, что меди в земной коре содержится лишь 0,0001% ее массы.

В периодической системе элементов Д. И. Менделеева алюминий является тринадцатым элементом, находится в третьем периоде, третьем ряду и в третьей группе. Атомный вес алюминия — 26,9815.

Несмотря на широкое распространение в природе алюминий удалось получить в количестве, необходимом для определения его основных свойств, только в 1845 г. В 1910 г. во всем мире было произведено 10 тыс. т алюминия, в 1938 — 567 тыс. т, а в настоящее время производство алюминия достигло нескольких миллионов тонн в год.

При изготовлении электродвигателей алюминий первоначально нашел применение для литых короткозамкнутых обмоток роторов (беличьих клеток). Вначале алюминием заливались роторы электродвигателей малой мощности. Сейчас алюминиевые обмотки широко применяются для роторов электрических машин мощностью 100 кВт и выше; изготовлены опытные электродвигатели серии ВАО 12—15-го габаритов, в которых алюминиевая беличья клетка ротора весит более 120 кг. Несомненно, что в ближайшие годы короткозамкнутые роторы асинхронных электродвигателей почти всех мощностей будут выполняться с алюминиевой литой обмоткой.

Результаты сравнительных испытаний асинхронных электродвигателей мощностью до 100 кВт показали, что по энергетическим, пусковым, перегрузочным и тепловым параметрам электродвигатели с алюминиевой литой обмоткой ротора не уступают электродвигателям с обмоткой ротора, выполненной из медных проводников (табл. 1).

Таблица 1

Показатели	К. п. д.	cosφ	Максимальная мощность	Тормозной момент	Пусковой момент	Пусковой ток	Температура нагрева статорных обмоток, °С
Относительные значения для электродвигателя с алюминиевой клеткой ротора по сравнению с электродвигателем с обмоткой ротора, выполненной из медных проводников, %	99,5	101	104	108	153	113	88

Для электродвигателя А101-4 экономия меди на каждом роторе составляет 46 кг, а экономия в стоимости материалов — 35 руб. 89 коп.

В связи с опережением темпа выпуска электрических машин по сравнению с темпом выплавки меди, годовой прирост производства которой составляет 5—6%, помимо применения алюминия для обмоток роторов разработаны конструкции и изготовляются электродвигатели, в которых и обмотка статора выполнена алюминиевым проводом. В настоящее время наша электропромышленность выпускает электродвигатели мощностью от 0,6 до 100 кВт, являющиеся самыми распространенными электрическими машинами, потребляющими до 40% всей электроэнергии, вырабатываемой в нашей стране, в виде единой серии А2 и АО2, темп роста выпуска составляет около 10% в год. Серия состоит из девяти габаритов, различающихся между собой наружным диаметром сердечника стали, а каждый габарит имеет две длины сердечника. Таким образом, серия состоит из 18 типоразмеров. Шкала мощности твердая с повторяющимися значениями мощности для различных частот вращения: 0,6—0,8—1,1—1,5—2,2—3,0—4,0—5,5—7,5—10—13—17 — 22—30—40—55—75 и 100 кВт.

Электродвигатели 1—5-го габаритов имеют закрытое обдуваемое исполнение (обозначение АО2), а 6—9-го — защищенное (обозначение А2) и закрытое исполнение.

Помимо основного исполнения с медной обмоткой статора и короткозамкнутым ротором серия имеет различные модификации; с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, с фазным ротором и др. Одной из модификаций является выполнение

обмотки статора из алюминиевого провода. Электродвигатели с обмоткой статора из алюминиевого провода предусмотрены для всех девяти габаритов серии, но только по одной большей длине в каждом габарите, причем электродвигатели на мощность первой длины каждого габарита выполняются в размерах электродвигателя второй (большей) длины этого же габарита, что вызывается разницей в удельных сопротивлениях меди и алюминия.

Шкала номинальных мощностей и диапазоны частот вращения электродвигателей с алюминиевой обмоткой статора такие же, как у электродвигателей А2 и АО2 основного исполнения, но номинальные мощности на одну ступень ниже, чем для соответствующих по типоразмеру электродвигателей основного исполнения, и относятся только к электродвигателям вторых длин каждого габарита.

Однако даже учитывая, что электродвигатели первых длин каждого габарита с алюминиевой обмоткой не производятся, перевод на алюминиевую обмотку электродвигателей вторых длин в каждом габарите позволяет высвободить до 50% общего количества меди, расходуемой на изготовление электродвигателей серии А2 и АО2. Если бы удалось перевести на алюминиевую обмотку все электродвигатели этой серии, то это могло бы высвободить до 20% общей потребности обмоточной меди для электродвигателей. К сожалению, полная замена меди алюминием в обмотках статоров электродвигателей невозможна.

Поскольку у электродвигателей первой и второй длины каждого габарита совпадают установочные размеры (за исключением расстояния между отверстиями вдоль оси вращения электродвигателя, что не имеет существенного значения для монтажа), сохраняется взаимозаменяемость электродвигателей с медными и алюминиевыми обмотками.

Значение $\cos\varphi$ электродвигателей с алюминиевой обмоткой статора практически находится на уровне значений у двигателей с медной обмоткой, а значение к. п. д. ниже в среднем на 1,2%. Отношения начального пускового, максимального и минимального моментов вращения к номинальному, а также начального пускового тока к номинальному практически соответствуют значениям для электродвигателей основного исполнения равной

мощности и частоты вращения. Значение махового момента соответствует значениям, относящимся к электродвигателям основного исполнения данного габарита второй длины.

По конструктивному исполнению электродвигатели с алюминиевой обмоткой статора отличаются от электродвигателей серии А2 и АО2 основного исполнения только обмоточными данными при полном совпадении геометрических размеров.

Для сохранения уровня допустимых значений превышения температуры обмотки статора, а также скорости нарастания температуры обмотки статора при пуске небольшая часть электродвигателей с алюминиевой обмоткой отличается от электродвигателей основного исполнения (с медной обмоткой статора) не только обмоточными данными, но и размерами паза.

Предельное превышение температуры обмотки статора, замеренное методом сопротивления, при продолжительном режиме работы для электродвигателей с алюминиевой обмоткой статора составляет: 75 °С — для электродвигателей АО2 1—5-го габаритов и А2 6—9-го габаритов, что соответствует классу нагревостойкости изоляции Е по ГОСТ 183-66; 90 °С — для электродвигателей АО2 6—9-го габаритов, что соответствует классу нагревостойкости изоляции F по ГОСТ 183-66.

Хотя алюминий уступает меди как материал для изготовления обмотки статора и переход на алюминий является вынужденным решением, все же следует отметить, что замена медных проводов алюминиевыми при ремонте электродвигателей более рентабельна и технически целесообразна, чем применение переизолированных круглых медных обмоточных проводов, демонтированных из пазов электродвигателя. Это объясняется следующими обстоятельствами:

1. В полукустарных условиях, при которых производится обычно переизолировка круглых медных обмоточных проводов, нанесение на провод слоя изоляционной эмали практически неосуществимо; поэтому обычно выпускают провода, переизолированные двумя слоями хлопчатобумажной пряжи (по типу ПБД). Эти провода имеют утолщенную изоляцию, и поместить нужное количество проводов в паз современных электродвигателей, рассчитанных на провода с более тонкой изоляцией, не удается.

2. Для технологического процесса переизолировки круглых обмоточных проводов требуется много дорогостоящего оборудования (для извлечения проводов из пазов, их очистки от изоляции, сварки кусков, протяжки, переизолировки и испытания), которое не может быть эффективно использовано, что резко ухудшает показатели фондоотдачи электроремонтных предприятий.

3. Трудоемкость полного цикла работ по восстановлению обмоточных проводов очень высока, и стоимость восстановленного провода оказывается выше, чем стоимость нового провода. Кроме того, резко повышается трудоемкость извлечения обмоточного провода из пазов, так как приходится отказаться от обрезки лобовых частей и провода должны быть по возможности аккуратно вымотаны.

4. Необходимой операцией при восстановлении круглых обмоточных проводов является их протяжка на меньший диаметр после сварки, поэтому их нельзя использовать в той машине, откуда они вымотаны.

5. При всех условиях качество восстановленного провода оказывается недостаточно высоким и двигатели с обмоткой из таких проводов недостаточно надежными.

Рассмотрение вопроса замены при капитальном ремонте асинхронных электродвигателей медных обмоточных проводов алюминиевыми не может считаться достаточно полным без технико-экономического анализа.

При этом необходимо сравнить не только себестоимость капитального ремонта одних и тех же электродвигателей при обмотках из медного и алюминиевого провода, но и расходы предприятий по их эксплуатации.

Себестоимость капитального ремонта асинхронного электродвигателя слагается из стоимости материалов, заработной платы и накладных расходов.

При сравнении стоимости материалов будем рассматривать только стоимость обмоточных материалов и изоляции, а также припоя и флюса, так как расход остальных материалов практически не изменяется. Кроме того, учтем стоимость возвращаемого лома цветных металлов.

При сравнении стоимости заработной платы будем принимать во внимание только стоимость операций по соединению и пайке схемы. Стоимость остальных операций практически остается неизменной.

Сравнение проведем для трех короткозамкнутых электродвигателей: АО41-4 мощностью 1,7 кВт, А62-2 мощно-

Таблица 2

Материал	Расход материалов для электродвигателей типа					
	АО41-4		А62-2		А81-6	
	с медной обмоткой	с алюминиевой обмоткой	с медной обмоткой	с алюминиевой обмоткой	с медной обмоткой	с алюминиево обмоткой
Провод обмотки статора; его масса, кг	ПЭЛБО ⌀0,96; 2,98	ПЭВА-2 ⌀1,08; 1,16	ПЭЛБО ⌀1,4; 12,5	ПЭВА-2 ⌀1,56; 4,75	ПЭЛБО ⌀1,45; 23,2	ПЭВА-2 ⌀1,68 9,2
Изоляция, кг	0,12	0,07	0,25	0,15	0,60	0,35
Припои и флюсы, г	50	75	70	100	100	150
Лом цветных металлов (возврат), кг	2,68	1,04	11,25	4,27	20,88	8,28

Таблица 3

Материал	Стоимость материалов (руб) для электродвигателей типа								
	АО41-4			А62-2			А81-6		
	с медной обмоткой	с алюминиевой обмоткой	разница	с медной обмоткой	с алюминиевой обмоткой	разница	с медной обмоткой	с алюминиевой обмоткой	разница
Провод обмотки статора	4,90	2,03	+2,87	18,60	7,29	+11,31	34,45	13,80	+20,65
Изоляция	0,65	0,24	+0,41	1,30	0,50	+0,80	3,25	1,20	+2,05
Припои и флюсы	0,21	0,60	—0,39	0,29	0,80	—0,51	0,41	1,20	—0,79
Лом цветных металлов (возврат)	—	—0,81	+0,81	—	—3,37	+3,37	—	—6,30	+6,30
Всего	5,76	2,06	+3,70	20,19	5,22	+14,97	38,11	9,90	+28,21

стью 20 кВт и А81-6 мощностью 28 кВт. Для всех трех электродвигателей будем рассматривать исполнение на 380 В.

Расход обмоточных и изоляционных материалов, а также припоев и флюсов для медного и алюминиевого вариантов приведен в табл. 2.

Расценив материалы по действующим прейскурантам, определяем разницу в их стоимости (табл. 3).

Увеличение стоимости заработной платы на соединение и пайку схемы при алюминиевых обмоточных проводах по сравнению с медными, а также цеховых и общезаводских накладных расходов по действующим нормативам электроремонтных предприятий составляет (руб.):

Тип электродвигателя	АО41-4	А62-2	А81-6
Заработная плата	0,45	0,50	0,65
Накладные расходы 135%	0,61	0,68	0,78
Всего	1,06	1,18	1,43

Общая экономия по машинам с алюминиевой обмоткой составит (руб.):

Тип электродвигателя	АО41-4	А62-2	А81-6
Материалы	+3,70	+14,97	+28,21
Заработная плата с накладными расходами	—1,06	—1,18	—1,43
Всего	+2,64	+13,79	+26,78

Как видно из этих данных, по всем рассматриваемым машинам имеет место значительная экономия, достигающая 20—40% установленной прейскурантом стоимости ремонта. Однако эксплуатационная стоимость электродвигателей после замены медной обмотки на алюминиевую обычно возрастает. Как показано ниже, сохранение мощности электродвигателя при переходе на алюминиевую обмотку обычно возможно только в связи с повышением классов нагревостойкости изоляции и увеличением годовых потерь электроэнергии (кВт · ч), которое может быть подсчитано по формуле

$$d_w = P_н \left(\frac{1-\eta}{\eta}\right) \gamma T \left(1{,}63 \frac{Q_{вф1м}}{Q_{вф1а}} - 1\right),$$

где $P_н$ — номинальная мощность электродвигателя, кВт; η — номинальный к. п. д.; γ — удельный вес потерь в об-

мотке статора ко всем потерям; T — годовое число часов работы (при полной нагрузке); $Q_{эф1м}$ — сечение эффективного провода медной обмотки, мм²; $Q_{эф1а}$ — сечение эффективного провода алюминиевой обмотки, мм².

Приведенная формула является приближенной, так как электродвигатели обычно работают при нагрузке, меньшей номинальной, но для наших целей этой неточностью можно пренебречь, если принять уменьшенное число часов работы.

Значения параметров в формуле принимаем, как указано в табл. 4.

Таблица 4

Параметр	Тип электродвигателей		
	АО41-4	А62-2	А81-6
P, кВт	1,7	20	28
η	0,815	0,885	0,89
γ	0,49	0,46	0,5
T, ч/год	1 500	1 500	1 500
$Q_{эф1м}$, мм²	0,71	3,06	5,00
$Q_{эф1а}$, мм²	0,93	3,78	6,6

Определенные по этим значениям дополнительные потери энергии (кВт · ч/год), соответствующие им стоимости за год и за нормативный срок окупаемости, который принимается 5 лет, приведены в табл. 5; стоимость электроэнергии принята 1,1 коп/кВт · ч.

Таблица 5

Величины потерь	Для электродвигателей		
	АО41-4	А62-2	А81-6
Дополнительные потери, кВт·ч	71	575	625
Стоимость дополнительных потерь за год, руб.	0,78	6,33	6,88
То же за 5 лет, руб.	3,90	30,99	34,40

Как и следовало ожидать, перерасход от стоимости дополнительных потерь при эксплуатации электродвигателей с алюминиевой обмоткой в течение нормативного срока окупаемости превышает экономию, получаемую при капитальном ремонте. Это подтверждает, что в каче-

стве материала для изготовления обмоток статоров асинхронных электродвигателей медь превосходит алюминий и переход на алюминиевые обмотки статоров является вынужденным решением.

В настоящей работе автор ставит целью дать методику расчета и пересчета обмоток электродвигателя при ремонте с заменой медной обмотки статоров на алюминиевую для случаев сохранения и изменения его параметров, а также осветить технологические особенности ремонта, вызванные применением алюминиевого провода.

Глава первая

РАСЧЕТЫ И ПЕРЕСЧЕТЫ ОБМОТОК

При ремонте электродвигателя с обмоткой статора, выполненной алюминиевым проводом, а также при ремонте, связанном с заменой медного провода на алюминиевый, может возникнуть необходимость в следующих расчетах и пересчетах:

поверочный расчет — производится при ремонте электродвигателя с обмоткой статора, выполненной алюминиевым проводом, с сохранением заводских данных электродвигателя и применением при ремонте также алюминиевого провода;

расчет для определения (восстановления) обмоточных данных;

пересчет электродвигателя с обмоткой из медного провода при замене медного провода алюминиевым;

Таблица 6

Измеряемая величина	Значение для		Отношение значений (алюминия к меди)
	алюминия	меди	
Плотность, г/см³	2,7	8,9	0,3
Удельное сопротивление при 20 °С, Ом·мм²/м	0,028	0,017	1,63
Удельная проводимость при 20 °С, м/(Ом·мм²)	36	59	0,61
Температурный коэффициент электрического сопротивления	0,004	0,004	1,0
Удельная теплоемкость (на единицу массы), Вт·с/(кг·°С)	900	395	2,28
Удельная теплоемкость (на единицу объема), Вт·с/(см³·°С)	2 420	3 510	0,69
Прочность на разрыв мягкой проволоки, кгс/мм²	10	25	0,4
Коэффициент линейного расширения, 1/°С	$2,3\cdot10^{-5}$	$1,7\cdot10^{-5}$	1,35
Температура плавления, °С	660	1 080	0,61
Теплопроводность, Вт/(см²·с·°С)	2	3	0,67

пересчет обмотки электродвигателя для определения его мощности в связи с изменением коэффициента заполнения паза;

пересчет обмотки при изменении номинального напряжения электродвигателя;

пересчет обмотки при изменении номинальной частоты вращения.

Методика расчетов и пересчетов обмотки электродвигателя, выполненной из медного или алюминиевого провода, одинакова; расчетные формулы отличаются только численными значениями величин в зависимости от того, относятся ли они к меди или алюминию. Сравнение основных свойств меди и алюминия приведено в табл. 6

1-1. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ

Электроремонтное предприятие обычно располагает альбомами обмоточных данных электродвигателей разных типов и серий как выпускаемых в настоящее время, так и снятых с производства, и весьма вероятно, что в альбоме содержатся технические и обмоточные данные электродвигателя, подлежащего ремонту. Если нет сомнения в том, что электродвигатель, подлежащий ремонту, полностью соответствует указанному в альбоме, то нет надобности в выполнении поверочного расчета при условии, если ремонт производят с полным повторением заводского исполнения.

При отсутствии в альбомах данных, относящихся к ремонтируемому электродвигателю, поверочный расчет, хотя бы приближенный (сокращенный), необходим, даже если при ремонте не предполагают производить каких-либо изменений его параметров.

Это объясняется тем, что электродвигатель мог раньше подвергаться перемотке, при которой были произведены недопустимые отступления от заводского исполнения или допущены ошибки в обмоточных данных. Поверочный расчет позволяет определить эти отступления и ошибки.

В распоряжении ремонтного предприятия может отсутствовать обмоточный провод того размера и марки, какой применен в заводском исполнении, могут отсутствовать материалы нужной толщины для пазовой изоляции. Предприятие может не располагать устройствами и приспособлениями, обеспечивающими такую же плот-

ность укладки проводов в пазу, как на электромашиностроительных заводах. Поэтому несмотря на то, что отступления от заводского исполнения в этих случаях являются неизбежными, их допустимость должна быть проверена, а влияние на параметры электродвигателя должно быть определено поверочным расчетом.

В задачу поверочного расчета обмотки статора электродвигателя входит определение магнитных и электрических нагрузок, а также проверка степени заполнения паза и сравнение их с допустимыми величинами.

В ходе расчета определяются:

B_δ — индукция в зазоре, Тл;
$B_{з1}$ — индукция в зубцах, Тл;
B_{c1} — индукция в спинке сердечника, Тл;
j_1 — плотность тока, А/мм²;
A_1 — линейная нагрузка, А/см;
$k_{з.с}$ — коэффициент заполнения свободного сечения паза.

Для приближенного расчета служат формулы

$$B_\delta = \frac{2{,}5 U_{ф1} p a_1 10^2}{Z_1 D_1 l_1 k_{об1} w_{эф.п1}}; \qquad (1)$$

$$B_{з1} = 1{,}1 B_\delta \frac{t_{з1}}{b_{з1}} \frac{l_1}{l_{эф1}}; \qquad (2)$$

$$B_{c1} = 0{,}58 \frac{B_\delta}{p} \frac{D_1}{h_{c1}} \frac{l_1}{l_{эф1}}. \qquad (3)$$

(значения величин в формулах (1)—(3) см. пример на стр. 23).

Величина $l_{эф1}$ (см) вычисляется согласно формуле

$$l_{эф1} = k_{c1}(l_1 - n_{к1} b_{к1}), \qquad (4)$$

где k_{c1} — коэффициент заполнения пакета стали, зависящий от толщины листов, вида межлистовой изоляции и учитывающий неплотное прилегание листов друг к другу. Значение коэффициента k_{c1} указано в табл. 7.

Таблица 7

Толщина листа, мм	Вид межлистовой изоляции		
	Бумага	Лак	Оксидная изоляция или без изоляции
0,5	0,9	0,93	0,95
0,35	0,87	0,91	0,93

При отсутствии радиальных вентиляционных каналов в формулах (2) и (3) отношение $l_1/l_{эф1}$ принимается равным $1/k_{c1}$.

Расчетная ширина зубца (см) определяется:

$$b_{з_1} = \frac{2}{3} b''_{з_1} + \frac{1}{3} b'_{з_1}. \qquad (5)$$

Обмоточный коэффициент $k_{об1}$, зависящий от числа катушек, входящих в катушечную группу (число пазов на полюс и фазу $q_1 = Z_1/6p$) и укорочения шага $\beta_1 = 2py_{п1}/Z_1$, принимается по табл. 8.

Таблица 8

Число катушек в катушечной группе q_1	Укорочение шага обмотки в долях единицы										
	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,5
	Обмоточный коэффициент										
1	1,000	0,997	0,988	0,972	0,951	0,924	0,891	0,853	0,809	0,760	0,700
2	0,966	0,963	0,954	0,939	0,919	0,893	0,861	0,824	0,781	0,734	0,676
3	0,960	0,957	0,948	0,933	0;913	0,887	0,855	0,819	0,779	0,730	0,672
4	0,958	0,955	0,947	0,931	0,911	0,885	0,854	0,817	0,777	0,728	0,671
5—7	0,957	0,954	0,946	0,930	0,910	0,884	0,853	0,816	0,774	0,727	0,670
8	0,956	0,953	0,945	0,929	0,909	0,883	0,852	0,815	0,773	0,727	0,669
9 и более	0,955	0,952	0,944	0,928	0,908	0,882	0,851	0,815	0,773	0,726	0,668

Для промежуточных значений сокращения шага этот коэффициент определяется интерполяцией или более точно по формуле

$$k_{об_1} = \sin(\beta 90)^\circ \frac{0,5}{q_1 \sin \frac{30^\circ}{q_1}} \qquad (6)$$

Зубцовый шаг (см)

$$t_{з_1} = \frac{\pi D_1}{Z_1}. \qquad (7)$$

Величина номинального тока (А) в фазе обмотки статора составляет:

при соединении фаз звездой

$$I_{ф1} = \frac{1\,000P}{\sqrt{3}Uk_э}; \qquad (8)$$

при соединении фаз треугольником

$$I_{ф1} = \frac{1\,000P}{3Uk_э}, \qquad (9)$$

где $k_э$ — энергетический коэффициент, равный произведению к. п. д. электродвигателя на коэффициент мощности; для двигателей с алюминиевой обмоткой принимается по табл. 9.

Таблица 9

Мощность, кВт	Электродвигатели короткозамкнутые защищенного исполнения				Электродвигатели короткозамкнутые закрытого обдуваемого исполнения				Электродвигатели с фазным ротором защищенного исполнения		
	Число полюсов										
	2	4	6	8	2	4	6	8	4	6	8
0,6	—	0,55	—	—	—	0,55	—	—	—	—	—
1,0	0,65	0,60	0,54	—	0,65	0,60	0,54	—	—	—	—
1,7	0,68	0,64	0,58	—	0,68	0,64	0,58	—	—	0,50	—
2,8	0,71	0,68	0,62	0,62	0,71	0,68	0,62	—	0,61	0,54	—
4,5	0,73	0,70	0,65	0,63	0,73	0,70	0,65	0,62	0,64	0,58	0,53
7,0	0,75	0,72	0,67	0,64	0,75	0,72	0,67	0,65	0,67	0,60	0,57
10,0	0,75	0,74	0,68	0,65	0,75	0,74	0,68	0,67	0,68	0,62	0,60
14,0	0,75	0,75	0,69	0,68	0,76	0,75	0,70	0,69	0,70	0,64	0,61
20,0	0,76	0,76	0,71	0,70	0,77	0,76	0,72	0,70	0,71	0,67	0,64
28,0	0,78	0,77	0,73	0,71	0,78	0,77	0,74	0,71	0,73	0,68	0,67
40,0	0,79	0,78	0,75	0,73	0,79	0,78	0,75	0,73	0,74	0,69	0,68
55,0	0,80	0,78	0,76	0,74	0,80	0,78	0,77	0,74	0,75	0,70	0,70
75,0	0,81	0,79	0,78	—	0,81	0,79	0,79	—	0,76	0,72	—
100,0	0,82	0,79	—	—	0,82	0,80	—	—	0,77	—	—

Сечение эффективного провода $Q_{эф1}$ (мм²) определяется как сумма сечений всех элементарных проводников, входящих в эффективный провод. Если эффективный провод состоит из m_1 одинаковых элементарных проводников, то

$$Q_{эф1}=m_1 q_{эл1}, \tag{10}$$

где $q_{эл1}$ — сечение элементарного проводника, мм².

Плотность тока в обмотке статора (А/мм²) составляет:

$$j_1=\frac{I_{ф1}}{a_1 Q_{эф1}}. \tag{11}$$

Линейная нагрузка (А/см) определяется по формуле

$$A_1=\frac{Z_1 w_{эф.п1} I_{ф1}}{\pi D_1 a_1}. \tag{12}$$

Общим коэффициентом заполнения паза статора называется отношение общего сечения всех проводников

(мм²), уложенных в паз, ко всему сечению паза в свету (мм²):

$$k_{з1} = \frac{w_{эф.п1} Q_{эф1}}{Q_{п1}} = \frac{w_{эф.п1} m_1 q_{эл1}}{Q_{п1}}. \quad (13)$$

Общий коэффициент заполнения паза статора может быть представлен произведением трех частных коэффициентов заполнения

$$k_{з1} = k_{с.с1} k_{з.п1} k_{з.с1}, \quad (14)$$

где $k_{с.с1}$ — коэффициент свободного сечения паза, равный отношению свободного сечения паза ко всему сечению паза в свету:

$$k_{с.с1} = \frac{Q_{с.п1}}{Q_{п1}}. \quad (15)$$

Величину $Q_{п1}$ вычисляют по одной из формул, приведенных на рис. 1, в зависимости от формы и размера паза.

Величину $Q_{с.п1}$ определяют, вычитая из $Q_{п1}$ площадь $Q_{из1}$, занятую пазовой изоляцией, клином, прокладками в пазу и под клином, для чего необходимо располагать данными о конструкции изоляции обмотки:

$$Q_{с.п1} = Q_{п1} - Q_{из1}. \quad (16)$$

Обычно значение $k_{с.с1}$ лежит в пределах 0,7—0,8. Этот коэффициент тем больше, чем тоньше изоляция паза, клина и прокладки в пазу; $k_{з.п1}$ — коэффициент заполнения провода, равный отношению сечения неизолированного провода к площади прямоугольника, описанного вокруг изолированного провода; для круглых проводов таким прямоугольником является квадрат и для них

$$k_{з.п1} = \frac{\pi d_1^2}{4 d_{из1}^2}. \quad (17)$$

Коэффициент заполнения провода тем больше, чем тоньше изоляция провода. Для алюминиевых круглых проводов марок ПЭВА-2 и ПЭЛРА-2, применяемых при ремонте электродвигателей мощностью 0,6—100 кВт, этот коэффициент (наряду с другими показателями для алюминиевых проводов) приведен в табл. 10 и, как следует из таблицы, лежит в пределах 0,65—0,73; $k_{з.с1}$ — коэффициент заполнения свободного сечения паза статора, равный отношению суммы площадей прямоугольников, опи-

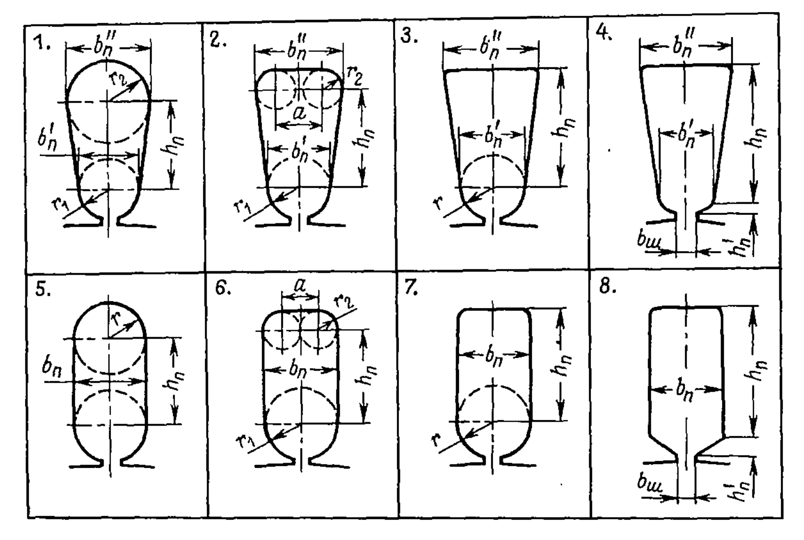


Рис. 1. Наиболее распространенные формы пазов.

Площади пазов формы:

$$1 - \frac{\pi}{8}(b'^2_п + b''^2_п) + \frac{h_п}{2}(b'_п + b''_п);$$

$$2 - \frac{\pi}{8}(r_1^2 + r_2^2) + \frac{h_п}{2}(b'_п + b''_п) + r_2 a;$$

$$3 - \frac{\pi}{8} b'^2_п + \frac{h_п}{2}(b'_п + b''_п); \quad 4 - \frac{h_п}{2}(b'_п + b''_п) + \frac{h'_п}{2}(b_ш + b'_п);$$

$$5 - \frac{\pi}{4} b_п^2 + h_п b_п; \quad 6 - \frac{\pi}{8} b_п^2 + \frac{\pi}{8} r_2^2 + h_п b_п + r_2 a;$$

$$7 - \frac{\pi}{8} b_п^2 + h_п b_п; \quad 8 - h_п b_п + \frac{h'_п}{2}(b_ш + b_п).$$

санных вокруг всех проводов, уложенных в пазы, к свободному сечению паза $Q_{с.п1}$. Для круглого провода, если число уложенных проводников обозначить через n_1,

$$k_{з.с1} = \frac{n_1 d^2_{из1}}{Q_{с.п1}}. \qquad (18)$$

Этот коэффициент тем больше, чем плотнее удается заполнить паз. Допустимая величина $k_{з.с1}$ должна учитывать квалификацию обмотчиков и для алюминиевых проводов находиться в пределах 0,72—0,75. Здесь следует отметить, что для медных проводов более жестких, чем алюминиевые, этот коэффициент находится в пределах 0,65—0,7.

Таблица 10

Номинальный диаметр алюминиевой жилы d, мм	Сечение алюминиевой жилы q, мм²	Радиальная толщина изоляции Δ, мм	Диаметр изолированного провода $d_{из}$, мм	Масса провода на единицу длины G, кг/км	Коэффициент заполнения провода $k_{з.п}$
0,57	0,2552	0,0275	0,625	0,753	0,65
0,59	0,2734	0,0275	0,645	0,805	0,65
0,62	0,3019	0,0275	0,675	0,885	0,66
0,64	0,3217	0,030	0,70	0,998	0,66
0,67	0,3526	0,030	0,73	1,030	0,66
0,69	0,3739	0,030	0,75	1,125	0,66
0,72	0,4072	0,030	0,78	1,19	0,67
0,74	0,4301	0,0325	0,805	1,26	0,67
0,77	0,4657	0,0325	0,835	1,36	0,67
0,80	0,5027	0,0325	0,865	1,46	0,67
0,83	0,5401	0,0325	0,895	1,57	0,67
0,86	0,5809	0,0325	0,925	1,68	0,68
0,90	0,6362	0,0325	0,965	1,84	0,68
0,93	0,6793	0,0325	0,995	1,95	0,68
0,96	0,7238	0,0325	1,025	2,08	0,68
1,00	0,7854	0,040	1,08	2,28	0,68
1,04	0,8495	0,040	1,12	2,46	0,68
1,08	0,9161	0,040	1,16	2,65	0,68
1,12	0,9852	0,040	1,20	2,84	0,68
1,16	1,0568	0,040	1,24	3,04	0,69
1,20	1,1310	0,040	1,28	3,25	0,69
1,25	1,227	0,040	1,33	3,51	0,69
1,30	1,327	0,040	1,38	3,79	0,69
1,35	1,431	0,040	1,43	4,08	0,70
1,40	1,539	0,040	1,48	4,39	0,70
1,45	1,651	0,040	1,53	4,69	0,71
1,50	1,767	0,040	1,58	5,02	0,71
1,56	1,911	0,040	1,64	5,41	0,71
1,62	2,061	0,040	1,70	5,83	0,71
1,68	2,217	0,040	1,76	6,26	0,72
1,74	2,378	0,040	1,82	6,70	0,72
1,81	2,573	0,040	1,89	7,24	0,72
1,88	2,776	0,040	1,96	7,80	0,72
1,95	2,986	0,040	2,03	8,37	0,73
2,02	3,205	0,040	2,10	8,97	0,73
2,10	3,464	0,045	2,19	10,1	0,73
2,26	4,011	0,045	2,35	11,2	0,73
2,44	4,676	0,045	2,53	13,4	0,73

В справедливости формулы (14) можно убедиться, подставляя в нее значения частных коэффициентов, согласно формулам (15), (17) и (18):

$$k_{з1}=\frac{Q_{c.п1}}{Q_{п1}}\frac{\pi d_1^2}{4d_{из1}^2}\frac{n_1 d_{из1}^2}{Q_{c.п1}}=\frac{n_1\pi d_1^2}{4Q_{п1}}=\frac{w_{эф.п1}Q_{эф1}}{Q_{п1}}.$$

Общий коэффициент заполнения паза может иметь предельные значения от $0,7\times0,65\times0,72=0,33$ до $0,8\times\times0,73\times0,75=0,44$.

Результат поверочного расчета обмотки статора с алюминиевой обмоткой можно считать удовлетвори-

Таблица 11

Измеряемая величина	Допустимые значения для электродвигателей		Примечание
	защищенного исполнения	закрытого обдуваемого исполнения	
B_δ, Тл B_{c1}, Тл $B_{з1}$, Тл	0,5—0,95 1,3—1,7 1,4—1,9	0,5—0,95 1,3—1,6 1,4—1,8	Меньшие значения для электродвигателей меньших мощностей и меньшего числа полюсов
j_1, А/мм²	4—6	4—5	Меньшие значения для проводов больших сечений
A_1, А/см	200—500	200—400	Меньшие значения для электродвигателей меньших мощностей
j_1A_1, А²/мм²·см	Не более 1 700	Не более 1 500	—
$k_{з.с1}$	Не более 0,75	Не более 0,75	—

тельным, если вычисленные значения лежат в пределах, указанных в табл. 11.

Следует помнить, что электродвигатель с короткозамкнутым ротором может застревать при пуске на пониженной скорости. Эта ненормальность вызывается неправильными соотношениями числа пазов статора Z_1, ротора Z_2 и числа пар полюсов p.

Во избежание указанного явления должны быть выдержаны следующие соотношения:

$$\left.\begin{aligned} &Z_2 \neq 2p(3k+1); \quad Z_2 \neq 6pk; \\ &Z_2 \neq Z_1 + p; \quad Z_2 \neq \frac{Z_1 + 2p}{2}; \\ &Z_2 \neq 2(Z_1 + p); \quad Z_2 \neq Z_1 + 2p. \end{aligned}\right\} \qquad (19)$$

Чтобы избежать ненормальный гул и вибрацию, желательно, чтобы соблюдались соотношения

$$\left.\begin{aligned} Z_2 &\neq Z_1 \pm 2p \pm k; \\ Z_2 &\neq Z_1 \pm 6p \pm k. \end{aligned}\right\} \quad (20)$$

Кроме того, желательно, чтобы Z_2 было кратно числу пар полюсов.

В формулах (19) и (20) k — любое целое число от 1 до 4. Поэтому для электродвигателя с короткозамкнутым ротором помимо определения уровня электромагнитных нагрузок по табл. 11 необходимо проверить также соотношения чисел пазов статора и ротора и полюсов по формулам (19) и (20).

Пример. Поверочный расчет электродвигателя, технические и обмоточные данные которого следующие:

Мощность электродвигателя	$P = 4{,}5$ кВт
Напряжение	$U = 220/380$ В
Частота вращения (синхронная)	$n_c = 1\,500$ об/мин ($2p = 4$)
Внутренний диаметр сердечника статора	$D_1 = 15{,}2$ см
Полная длина сердечника	$l_1 = 9{,}4$ см
Активная длина сердечника	$l_{эф1} = 9{,}0$ см
Число пазов статора	$Z_1 = 36$
Форма паза	Форма 4, рис. I
Размеры паза:	$b_{ш1} = 3{,}2$ мм $b'_{п1} = 7{,}4$ мм $b''_{п1} = 10{,}8$ мм $h_{п1} = 24{,}75$ мм $h'_{п1} = 0{,}75$ мм
Ширина зубца в широком месте	$b''_{з1} = 0{,}81$ см
Ширина зубца в узком месте	$b'_{з1} = 0{,}48$ см
Высота спинки	$h_{c1} = 2{,}45$ см
Тип обмотки статора	Однослойная
Число эффективных проводов в пазу	$w_{эф.п1} = 32$
Число элементарных проводников в эффективном проводе	$m_1 = 2$
Диаметр неизолированного проводника	$d_1 = 1{,}35$ мм
Марка провода	ПЭВА-2
Число параллельных ветвей	$a_1 = 1$
Ротор электродвигателя	Короткозамкнутый
Число пазов ротора	$Z_2 = 26$
Исполнение электродвигателя	Защищенное

1. Определяем по формуле (1) индукцию в воздушном зазоре:

$$B_\delta = \frac{2{,}5 U_{ф1} p a_1 10^2}{Z_1 D_1 l_1 k_{об1} w_{эф.п1}} = \frac{2{,}5 \cdot 220 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^2}{36 \cdot 15{,}2 \cdot 9{,}4 \cdot 0{,}96 \cdot 32} = 0{,}69 \text{ Тл}.$$

Величина $k_{об1}$ согласно табл. 8 составляет 0,96; $q_1 = \frac{Z_1}{6p} = \frac{36}{12} = 3$, сокращение шага β_1 при катушечной однослойной обмотке равно 1.

2. Определяем по формуле (2) индукцию в зубце сердечника статора:

$$B_{з1} = 1,1 B_\delta \frac{t_{з1}}{b_{з1}} \frac{l_1}{l_{эф1}} = 1,1 \cdot 0,69 \frac{1,32}{0,7} \frac{9,4}{9,0} = 1,49 \text{ Тл}.$$

Величина $b_{з1}$ по формуле (5) составляет:

$$\frac{2}{3} b''_{з1} + \frac{1}{3} b'_{з1} = \frac{2}{3} 0,81 + \frac{1}{3} 0,48 = 0,7 \text{ см}.$$

Величина $t_{з1}$ по формуле (7) составляет:

$$\frac{\pi D_1}{Z_1} = \frac{3,14 \cdot 15,2}{36} = 1,32 \text{ см}.$$

3. Определяем по формуле (3) индукцию в спинке сердечника статора:

$$B_{с1} = 0,58 \frac{B_\delta}{p} \frac{D_1}{h_{с1}} \frac{l_1}{l_{эф1}} = 0,58 \cdot \frac{0,69}{2} \cdot \frac{15,2}{2,45} \cdot \frac{9,4}{9,0} = 1,3 \text{ Тл}.$$

4. Определяем по формуле (8) номинальный ток в фазе обмотки статора:

$$I_{ф1} = \frac{1\,000\,P}{3Uk_э} = \frac{1\,000 \cdot 4,5}{3 \cdot 220 \cdot 0,70} = 9,75 \text{ А}.$$

Величина $k_э$ согласно табл. 9 составляет 0,70.

5. Определяем по формуле (10) сечение эффективного провода в обмотке статора:

$$Q_{эф1} = m_1 q_{эл1} = 2 \cdot 1,431 = 2,862 \text{ мм}^2.$$

Величина $q_{эл1}$ согласно табл. 10 составляет 1,431 мм².

6. Определяем по формуле (11) плотность тока в обмотке статора:

$$j_1 = \frac{I_{ф1}}{a_1 Q_{эф1}} = \frac{9,75}{1 \cdot 2,862} = 3,4 \text{ А/мм}^2.$$

7. Определяем по формуле (12) линейную нагрузку обмотки статора:

$$A_1 = \frac{Z_1 w_{эф.п1} I_{ф1}}{\pi D_1 a_1} = \frac{36 \cdot 32 \cdot 9,75}{3,14 \cdot 15,2 \cdot 1} = 235 \text{ А/см}.$$

8. Определяем по расчетной формуле рис. 1 площадь паза в свету:

$$Q_{п1} = \frac{h_{п1}}{2} (b'_{п1} + b''_{п1}) + \frac{h'_{п1}}{2} (b_{ш1} + b'_{п1}) =$$

$$= \frac{24,75}{2} \cdot (7,4 + 10,8) + \frac{0,75}{2} (3,2 + 7,4) = 228 \text{ мм}^2.$$

9. Определяем площадь $Q_{из1}$, занятую пазовой изоляцией, клином, прокладками в пазу и под клином.

В соответствии с конструкцией изоляции обмотки (пазовая изоляция — пленкоэлектрокартон на лавсане толщиной 0,27 мм и стеклолакоткань толщиной 0,17 мм, клин толщиной 4 мм, подкладка под клин — пленкоэлектрокартон толщиной 0,27 мм и подкладка на дне паза — пленкоэлектрокартон толщиной 0,27 мм) $Q_{из1}$ составляет 54,7 мм².

10. Определяем по формуле (16) свободное сечение паза:

$$Q_{с.п1} = Q_{п1} - Q_{из1} = 228 - 54{,}7 = 173{,}3 \text{ мм}^2,$$

чему согласно формуле (15) соответствует коэффициент свободного сечения паза

$$k_{с.с1} = \frac{Q_{с.п1}}{Q_{п1}} = \frac{173{,}3}{228} = 0{,}76.$$

11. Определяем по формуле (18) коэффициент заполнения свободного сечения паза:

$$k_{з.с1} = \frac{n_1 d_{из1}^2}{Q_{с.п1}} = \frac{64 \cdot 1{,}43^2}{173{,}3} = 0{,}75.$$

Величина $d_{из1}$ согласно табл. 10 составляет 1,43 мм.

Общее число проводов, уложенных в паз,

$$n_1 = m_1 w_{эф.п1} = 2 \cdot 32 = 64.$$

12. Проверяем по формулам (19) и (20) соотношения числа пазов статора, ротора и числа полюсов:

$Z_2 \neq 2p(3k+1)$	$26 \neq 16,\ 28,\ 40,\ 52;$
$Z_2 \neq 6pk$	$26 \neq 12,\ 24,\ 36,\ 48;$
$Z_2 \neq Z_1 + p$	$26 \neq 38;$
$Z_2 \neq \frac{Z_1 + 2p}{2}$	$26 \neq 20;$
$Z_2 \neq 2(Z_1 + p)$	$26 \neq 76;$
$Z_2 \neq Z_1 + 2p$	$26 \neq 40;$
$Z_2 \neq Z_1 \pm 2p \pm k$	$26 \neq 28 \div 31,\ 33 \div 39,\ 41 \div 44;$
$Z_2 \neq Z_1 \pm 6p \pm k$	$26 \neq 20 \div 23,\ 25 \div 28,\ 44 \div 47,\ 49 \div 52.$

Число пазов ротора ($Z_2 = 26$) кратно числу пар полюсов ($p = 2$)

Согласно расчету электромагнитные нагрузки обмотки статора электродвигателя, а также коэффициент заполнения свободного сечения паза находятся в допустимых пределах, указанных в табл. 11.

Соотношения числа пазов статора, ротора и числа пар полюсов исключают возможность застревания ротора на пониженной частоте вращения, а также исключают повышенную вибрацию и ненормальный гул при работе электродвигателя.

1-2. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С АЛЮМИНИЕВОЙ ОБМОТКОЙ СТАТОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБМОТОЧНЫХ ДАННЫХ

При поступлении в ремонт электродвигателя, у которого демонтирована обмотка и отсутствует заводской паспорт (щиток), заказчик указывает напряжение сети, от которой должен работать электродвигатель после ремонта, и требуемую частоту вращения.

Электродвигатели малой и средней мощности могут быть выполнены на любое напряжение сети до 660 В; в этом диапазоне величина напряжения не влияет на ход расчета, и от него практически не зависит мощность электродвигателя.

В отношении частоты вращения электродвигателя требование заказчика должно быть проверено: заказчиком может быть задана такая частота вращения (число полюсов), при которой будет невозможно достаточно эффективно использовать активную часть сердечника электродвигателя и его мощность. В этом случае должно быть определено и сообщено заказчику число полюсов электродвигателя, при котором наиболее оптимально используются активные материалы электродвигателя в пределах их допустимого нагрева (в соответствии с классом нагревостойкости примененных электроизоляционных материалов) и тем самым обеспечивается длительный срок эксплуатации электродвигателя.

Восстановление обмоточных данных производится расчетным путем на основании снятых с натуры размеров электродвигателя и допустимых электромагнитных нагрузок, значения которых приведены в табл. 11.

Неправильные или недостаточно точные замеры могут повлечь за собой серьезные осложнения вплоть до полной непригодности перемотанного электродвигателя. Поэтому, несмотря на кажущуюся простоту, обмер электродвигателя требует достаточного внимания.

Каждое измерение должно повторяться 2—3 раза для того, чтобы была полная уверенность в правильности результатов. Рекомендуется сопровождать измерения поясняющими эскизами. Перед измерениями необходимо тщательно очистить электродвигатель от грязи, пыли и масла и продуть его сжатым воздухом; прочно приставшие частицы краски и лака удалить ножом или шабером. Ниже приводятся некоторые общие рекомендации по производству измерений.

Длину сердечников статора и ротора замеряют масштабной линейкой, прикладывая ее ко дну паза статора или ротора. Измерение по головкам зубцов может дать неверные результаты; по торцам сердечника крайние зубцы обычно расходятся, образуя так называемый «веер». Следует иметь в виду, что длины сердечников статора и ротора могут несколько отличаться друг от друга.

Внешний диаметр сердечника статора и внутренний диаметр сердечника ротора не всегда доступны для непосредственного измерения, так как на торцах пакетов стали могут быть расположены нажимные (торцевые) шайбы и кольцевые шпонки (замки), фиксирующие шайбы. В этих случаях приходится прибегать к косвенным измерениям; например, замерив высоту спинки статора и высоту зубца, определяют внешний диаметр сердечника по соотношению

$$D_{н1}=D_1+2h_{с1}+2h_{п1},$$

где D_1 — внутренний диаметр статора (диаметр расточки); $h_{с1}$ — высота спинки статора; $h_{п1}$ — высота паза статора.

Аналогично путем косвенных измерений определяется внутренний диаметр сердечника ротора.

Внутренний диаметр стали ротора некоторых электродвигателей малой мощности совпадает с диаметром вала, так как для них часто применяют насадку листов стали непосредственно на вал — без промежуточной втулки.

Размеры и площадь пазов. Снятие размеров пазов следует производить после тщательной расчистки поверхности пазов от остатка изоляции и лака, которые не всегда удается удалить при общей очистке электродвигателя.

В зависимости от формы пазов применяют те или иные обычные измерительные инструменты — штангенциркуль, масштабные линейки, калибры и т. д.

При необходимости определения размеров паза сложной формы наиболее совершенным является способ, по которому с паза снимают оттиск. Для этого вырезают четыре пластинки из листового свинца толщиной 2—3 мм, площадью, достаточной для перекрытия двух-трех пазов, прикладывают их к торцам сердечника и сжимают массивной полосой с помощью стяжного болта, как это указано на рис. 2. При затягивании гайки стяжного болта свинец вдавливается в пазы и на поверхности пла-

стики получается достаточно четкий оттиск паза, размеры которого могут быть легко измерены. По снятым размерам вычерчивается паз и вычисляется его площадь.

Воздушный зазор, т. е. зазор между статором и ротором, имеет существенное значение для эксплуатационных параметров электродвигателя. Увеличение воздушного зазора против номинального влечет за собой повышение тока холостого хода, уменьшение коэффициентов мощности и полезного действия. Ориентировочно каждый процент увеличения зазора влечет за собой повышение тока холостого хода на 0,6% и снижение коэффициента мощности на 0,3%. При увеличении зазора свыше 25% для двухполюсных электродвигателей и свыше 15% при большем числе полюсов электродвигатели должны перематываться по новым обмоточным данным (с увеличенным числом витков в пазу), а при увеличении зазора больше указанного экономическая целесообразность ремонта становится сомнительной.

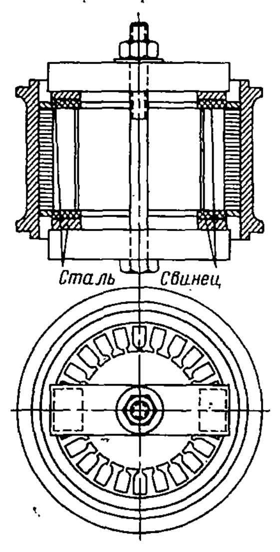


Рис. 2. Снятие оттиска пазов статора.

Увеличение воздушного зазора может быть вызвано проточкой внутренней поверхности статора или наружной поверхности ротора при ремонте электродвигателя, что является совершенно недопустимым. Описаны случаи [Л. 1], когда у отдельных электродвигателей, установленных на металлургическом заводе, после 15—20 лет эксплуатации воздушный зазор увеличился на 50—100% из-за шлифующего действия пыли, содержащейся в охлаждающем воздухе. Еще одной причиной увеличения зазора может явиться неправильное хранение электродвигателя на складе, при котором корродирует поверхность стали сердечников статора и ротора.

Учитывая, что в асинхронных двигателях абсолютная величина воздушного зазора невелика (например, для большинства электродвигателей единой серии типов А, АЛ, АС и АОЛ мощностью до 2,8 кВт номинальный зазор не превышает 0,3 мм), его измерение должно быть выполнено с максимально возможной точностью.

В собранном электродвигателе зазор измеряют с двух сторон (со стороны расположения схемы и со стороны, противоположной схеме) с помощью щупа, вводимого через смотровые или специальные люки в торцовых щитах. С каждой стороны измерение производят в четырех точках, сдвинутых между собой по окружности на 90°. Зазор определяют как среднеарифметическую величину всех замеров.

Некоторые электродвигатели, главным образом малой мощности, не имеют отверстий или люков, в которые можно ввести щуп. В таких электродвигателях зазор измеряют после их разборки. Для этого ротор заводят в расточку статора, укладывают непосредственно на пакет и замеряют зазор δ_1 против верхней точки расточки статора. Затем ротор поворачивают на 90° и вновь замеряют зазор δ_2 против той же точки статора. Величина зазора $\delta_{ср}$ определяется как

$$\delta_{ср}=\frac{\delta_1+\delta_2}{4}.$$

Допустимая величина воздушного зазора приведена в табл. 12.

Таблица 12

Мощность электродвигателя, кВт	Допустимый воздушный зазор, мм, при частоте вращения, об/мин			
	500—1 500		3 000	
	минимальный	максимальный	минимальный	максимальный
0,12—0,25	0,20	0,30	0,25	0,40
0,37—0,75	0,25	0,40	0,30	0,50
1,1—2,2	0,30	0,50	0,35	0,60
3,0—7,5	0,35	0,60	0,50	0,80
10,0—17,5	0,40	0,70	0,65	1,00
22,0—55,0	0,50	0,80	0,80	1,25
75,0—100,0	0,65	1,00	1,00	1,50

Последовательность проведения расчета:

1. Определяем число полюсов электродвигателя; минимальное число полюсов составляет:

$$2p=0{,}66\frac{D_1}{h_{c1}}$$

(с округлением до ближайшего четного числа). Это соотношение вытекает из формулы (3) при предельных

численных значениях B_δ и B_{c1}, указанных в табл. 11, и отношения $l_1/l_{эф1}=1{,}05$.

Однако в связи с тем, что B и B_{c1} изменяются в широких пределах, приведенное выше определение числа полюсов по отношению D_1/h_{c1} является ориентировочным и должно быть уточнено в ходе дальнейшего расчета. При правильно определенном числе полюсов индукция на всех участках магнитной цепи находится в нужных и допустимых пределах; при неправильном определении числа полюсов отдельные участки магнитной цепи будут перегружены или недогружены.

Некоторую ориентировку о частоте вращения, на которую рассчитан и предназначен электродвигатель, может дать сравнение электродвигателей одинаковой мощности, но с различным числом полюсов; относительно большая (высокая) спинка сердечника статора указывает на малое число полюсов и, наоборот, ее малая высота свидетельствует о том, что электродвигатель был запроектирован, как тихоходный.

2. Проверяем (для электродвигателей с короткозамкнутым ротором) заданное число полюсов по соотношению чисел пазов статора и ротора по формулам (19) и (20).

3. Определяем в соответствии с заданным числом полюсов и геометрическими размерами статора:

$$\tau=\frac{\pi D_1}{2p},\ \text{см};$$

$t_{з1}$ — по формуле (7), см;
$b_{з1}$ — по формуле (5), см;

$$h_{c1}=\frac{D_{н1}-D_1}{2}-h_{п1},\ \text{см};$$

$Q_{п1}$ — по формуле, приведенной на рис. 1, в зависимости от формы и размеров паза, мм^2;
$l_{эф1}$ — по формуле (4), см.

4. Выбираем тип обмотки (однослойная или двухслойная), величину укорочения шага $\beta_1=2py_{п1}/Z_1$ при двухслойной обмотке и обмоточный коэффициент $k_{об1}$, соответствующий этому укорочению (по табл. 8).

Для электродвигателей малой мощности, например, для электродвигателей единой серии АО 3-го и 4-го габаритов и двухполюсных электродвигателей 5-го габари-

та обычно применяют однослойную обмотку; для более мощных электродвигателей — двухслойную.

Применение однослойной обмотки для электродвигателей малой мощности предпочтительно, так как позволяет избавиться от межкатушечной прокладки в пазу, что улучшает заполнение паза и особенно важно при относительно малой площади паза.

Отметим, что применение однослойных обмоток в принципе вполне возможно и даже может оказаться целесообразным для более крупных электродвигателей.

Двухслойные обмотки применяются с укорочением шага $\beta_1 = 0{,}8 \div 0{,}9$. Применение такого укорочения благоприятно для электродвигателя: уменьшается длина лобовых частей катушки, что приводит к экономии обмоточного провода и уменьшению потерь в обмотке; уменьшается индуктивное сопротивление обмотки; уменьшаются амплитуды наиболее опасных гармоник тока.

5. Выбираем по табл. 11 индукцию в воздушном зазоре B_δ и определяем соответствующие ей индукции в спинке сердечника статора B_{c1} и в зубцах $B_{з1}$.

Выбор индукции является ответственной частью расчета. Если индукция, выбранная при ремонте, будет больше, чем заложенная при заводском расчете электродвигателя, то уменьшается $\cos\varphi$ из-за увеличения реактивной составляющей тока, может уменьшиться к. п. д. и увеличиться нагрев электродвигателя — из-за увеличения потерь в активной стали. Следует учитывать, что чрезмерный нагрев электродвигателя приводит к резкому сокращению срока его службы.

Наряду с этим при увеличении индукции возрастают пусковой и максимальный моменты вращения, что является положительным эксплуатационным фактором.

При снижении индукции по сравнению с расчетной наряду с увеличением $\cos\varphi$ снижаются пусковой и максимальный моменты. Коэффициент полезного действия электродвигателя может также понизиться из-за увеличения потерь в обмотке. Снижение индукции связано с увеличением числа эффективных проводов в пазу и соответствующим уменьшением их сечения, т. е. с увеличением сопротивления обмотки.

При выборе B_δ следует руководствоваться данными табл. 11; но так как в таблице эта величина приводится в широких пределах в зависимости от мощности электродвигателя, частоты его вращения и исполнения, то сле-

дует задаться несколькими (обычно тремя) вариантами B_δ и дальнейший расчет производить для каждого из этих вариантов.

Показателем правильно выбранной индукции в зазоре будут являться зависящие от нее величины индукции в спинке и зубцах статора; эти величины должны соответствовать данным, указанным в табл. 11, и если они значительно отклоняются от табличных, необходимо соответственно увеличить или уменьшить B_δ.

Если B_{c1} резко отличается от предельно допустимых по табл. 11, следует откорректировать предварительно выбранную частоту вращения электродвигателя, а именно: при малых индукциях в спинке повторить расчет, приняв меньшее число полюсов; при чрезмерно больших индукциях — повторить расчет, исходя из большего числа полюсов.

6. Определяем, в соответствии с выбранной конструкцией изоляции площадь $Q_{из1}$, занятую пазовой изоляцией (пазовой коробкой), клином, прокладками в пазу и под клин, определяем по формуле (16) свободное сечение паза $Q_{сп1}$ и по формуле (15) соответствующий этому коэффициент свободного сечения паза.

7. Определяем число эффективных проводов в пазу $w_{эф.п1}$. Как следует из формулы (1)

$$w_{эф.п1} = \frac{2{,}5 U_{ф1} p a_1 \cdot 10^2}{B_\delta Z_1 D_1 l_1 k_{об1}},$$

т. е. при известных геометрических размерах статора, напряжении, числе полюсов и выбранной индукции в воздушном зазоре, число эффективных проводов зависит от количества параллельных ветвей в обмотке.

Выбор обмотки с параллельными ветвями, а также, как это указывается дальше в п. 8, разбивка эффективного провода на параллельно соединенные элементарные проводники диктуется тем, что диаметр токоведущей жилы алюминиевого провода не должен быть больше 2,26 мм; укладка в паз провода большего диаметра затруднена из-за его жесткости и может привести к повреждению пазовых коробок, особенно на выходе из паза, и изоляции провода. Во избежание повреждения изоляция провода при его укладке в пазы его диаметр (с изоляцией) должен быть на 0,6—0,7 мм меньше размера шлица паза.

Вместе с тем необходимо учитывать, что чрезмерное дробление эффективного провода на элементарные проводники очень малого диаметра также нежелательно, так как ухудшает общий коэффициент заполнения паза $k_{з1}$; чем меньше диаметр провода, тем ниже коэффициент заполнения провода $k_{з.п1}$, являющийся согласно формуле (14) одним из составляющих $k_{з1}$. Кроме того, алюминиевые провода диаметром менее 0,8 мм вообще не должны применяться для обмоток статора, так как очень вытягиваются при изготовлении катушек.

Как известно, число параллельных ветвей в фазе не может быть произвольным, оно зависит от числа полюсов и вида обмотки; исходя из условия, что число параллельных ветвей не может выражаться дробным числом, частное от деления p на a_1 для простых однослойных обмоток и частное от деления $2p$ на a_1 для двухслойных и однослойных обмоток, выполненных «вразвалку», должно быть целым числом.

Практически для обмоток электродвигателей мощностью до 100 кВт применяется число параллельных ветвей в фазе, указанное в табл. 13; расчет следует вести для двух-трех вариантов числа a_1.

Таблица 13

Вид обмотки	Применяемое значение a_1 при числе полюсов					
	2	4	6	8	10	12
Простая однослойная	1	1; 2	1; 3	1; 2; 4	1; 5	1; 2; 3; 6
Двухслойная, однослойная, выполненная „вразвалку“	1; 2	1; 2	1; 2; 3	1; 2; 4	1; 2; 5	1; 2; 3; 4; 6

Следует учитывать, что с увеличением числа параллельных ветвей в фазе усложняется монтаж обмоток из-за увеличения количества внутримашинных соединений.

8. Определяем диаметр и сечение элементарного проводника, закладываемого в паз.

Из формулы (18) диаметр изолированного элементарного проводника (мм) равен:

$$d_{эл.и1} = \sqrt{\frac{Q_{с.п1} k_{з.с1}}{n_1}},$$

где n_1 — общее число элементарных проводников в пазу, которое можно представить как $n_1 = m_1 w_{эф.п1}$;

m_1 — число параллельных элементарных проводников в каждом эффективном проводе.

Таким образом,

$$d_{эл.п1} = \sqrt{\frac{Q_{c.п1} k_{з.c1}}{m_1 w_{эф.п1}}}.$$

Величина $k_{з.c1}$, как это указывалось выше, составляет для алюминиевых обмоток 0,72—0,75. Низший предел коэффициента применяется при глубоких узких пазах (т. е. при большом отношении глубины паза к его ширине), а верхний предел — при неглубоких широких пазах.

Число параллельных элементарных проводников в каждом эффективном проводе m_1 в некоторой степени предопределено количеством параллельных ветвей в обмотке a_1; чем больше a_1, тем соответственно меньше величина m_1.

Для нахождения $d_{эл.п1}$ задаются несколькими вариантами m_1 и определяют, при каком из них диаметр элементарного проводника будет не больше, чем предельно допустимый 2,26 мм, и не меньше, чем 0,8 мм. Если диаметр элементарного проводника при всех значениях m_1 оказывается больше 2,26 или меньше 0,8 мм, следует изменить в сторону увеличения или уменьшения число a_1, благодаря чему соответственно увеличится или уменьшится $w_{эф.п1}$, и вести расчет при новом значении $w_{эф.п1}$.

Следует учитывать, что комплектовка эффективного провода из чрезмерно большого числа элементарных проводников вносит значительное усложнение в технологию заготовки и последующей укладки катушки в пазы. Применять $m_1 > 4 \div 5$ следует только в крайних случаях.

Следует, наконец, помнить, что заполнение паза при уменьшении величины m_1 улучшается. После определения $d_{эл.п1}$ сечение $q_{эл.1}$ находят по табл. 10.

9. Определяем номинальный фазный ток $I_{ф1}$, линейную нагрузку A_1 и произведение плотности тока на линейную нагрузку $j_1 A_1$.

Задаваясь двумя-тремя вариантами допустимой плотности тока по табл. 11, находим соответствующие каждому варианту: $I_{ф1}$ — по формуле (11); A_1 — по формуле (12).

Из рассматриваемых вариантов приемлемым является тот, при котором произведение $j_1 A_1$ удовлетворяет значениям, приведенным в табл. 11. Если все варианты окажутся неприемлемыми и произведение $j_1 A_1$, определяю-

щее нагрев электродвигателя, превзойдет допустимую величину, следует уменьшить предварительно выбранную плотность тока. Заниженное значение j_1A_1 свидетельствует о недостаточном использовании электродвигателя; в этом случае следует увеличить j_1.

10. Определяем кажущуюся мощность электродвигателя (кВ·А) исходя из определенного в п. 9 номинального тока:

$$P' = \frac{3I_{ф1}U_{ф1}}{1\,000}.$$

11. Определяем номинальную мощность электродвигателя P при $k_э$, указанных в табл. 9:

$$P = P'k_э.$$

Пример. Расчет обмотки статора электродвигателя с короткозамкнутым ротором при отсутствии паспорта электродвигателя и демонтированной обмотке статора.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Электродвигатель предназначен для работы от сети напряжением 500 В, с синхронной частотой вращения 750 об/мин ($2p=8$). При ремонте применить для обмотки статора алюминиевый обмоточный провод.

Данные замеров

Наружный диаметр сердечника статора	$D_{н1}=49,3$ см
Внутренний диаметр сердечника	$D_1=35,0$ см
Полная длина сердечника	$l_1=16,0$ см
Число вентиляционных каналов	$n_{к1}=3$
Ширина вентиляционного канала	$b_{к1}=1$ см
Коэффициент заполнения пакета стали (лаковая изоляция, толщина листов 0,5 мм)	$k_{с1}=0,93$
Число пазов статора	$Z_1=72$
Форма паза	Форма 4, рис. 1
Размеры паза:	$b_{ш1}=3,7$ мм
	$b'_{п1}=8,4$ мм
	$b''_{п1}=11,5$ мм
	$h_{п1}=38,0$ мм
	$h'_{п1}=1,0$ мм
Ширина зубца в широком месте	$b''_{з1}=1,15$ см
Ширина зубца в узком месте	$b'_{з1}=0,84$ см
Исполнение электродвигателя	Защищенное
Число пазов ротора	$Z_2=58$

Расчет

1. Проверяем минимальное число полюсов исходя из геометрических размеров статора:

$$2p \geqslant 0,66\frac{D_1}{h_{с1}} \geqslant (0,66)\ \frac{35,0}{3,35} \geqslant 6,9;$$

принимаем $2p=8$, тогда $q_1=3$.

2. Проверяем соответствие заданного числа полюсов по соотношению числа пазов статора и ротора:

$Z_2 \neq 2p(3k+1)$	$58 \neq 32,\ 56,\ 80,\ 104;$
$Z_2 \neq 6pk$	$58 \neq 24,\ 48,\ 72,\ 96;$
$Z_2 \neq Z_1 + p$	$58 \neq 76;$
$Z_2 \neq \frac{Z_1 + 2p}{2}$	$58 \neq 40;$
$Z_2 \neq 2(Z_1 + p)$	$58 \neq 152;$
$Z_2 \neq Z_1 + 2p$	$58 \neq 80;$
$Z_2 \neq Z_1 \pm 2p \pm k$	$58 \neq 60 \div 63;\ 65 \div 68;\ 76 \div 79;\ 81 \div 84;$
$Z_2 \neq Z_1 \pm 6p \pm k$	$58 \neq 44 \div 47;\ 49 \div 52;\ 92 \div 95;\ 97 \div 100.$

3. В соответствии с заданием и геометрическими размерами статора определяем:

$$\tau_1 = \frac{\pi D_1}{2p} = \frac{3,14 \cdot 35,0}{8} = 13,7 \text{ см};$$

$$t_{з1} = \frac{\pi D_1}{Z_1} = \frac{3,14 \cdot 35,0}{72} = 1,53 \text{ см};$$

$$b_{з1} = \frac{2}{3} b''_{з1} + \frac{1}{3} b'_{з1} = \frac{2}{3} 1,15 + \frac{1}{3} 0,84 = 1,05 \text{ см};$$

$$h_{с1} = \frac{D_{н1} - D_1}{2} - h_{п1} = \frac{49,3 - 35,0}{2} - 3,8 = 3,35 \text{ см};$$

$$Q_{п1} = \frac{h_{п1}}{2} (b'_{п1} + b''_{п1}) + \frac{h'_{п1}}{2} (b_{ш1} + b'_{п1}) =$$

$$= \frac{38,0}{2} (8,4 + 11,5) + \frac{1,0}{2} (3,7 + 8,4) = 384 \text{ мм}^2;$$

$$l_{эф1} = k_{с1} (l_1 - n_{к1} b_{к1}) = 0,93 (16,0 - 3 \cdot 1) = 12,1 \text{ см}.$$

4. Выбираем тип обмотки, величину укорочения шага β_1, соответствующий ему обмоточный коэффициент $k_{об1}$ и шаг обмотки $y_{п1}$.

В соответствии с приведенными рекомендациями выбираем двухслойную обмотку с укорочением шага:

$$y_{п1} = (0,8 \div 0,9) \frac{Z_1}{2p} = (0,8 \div 0,9) \frac{72}{8} = 7,2 \div 8,1 .$$

Принимаем $y_{п1} = 8 (1 \div 9)$, чему соответствует укорочение шага

$$\beta_1 = \frac{2p y_{п1}}{Z_1} = \frac{8 \cdot 8}{72} = 0,89.$$

Обмоточный коэффициент $k_{об1} = 0,945$ получен интерполяцией значений обмоточных коэффициентов, соответствующих укорочениям шага 0,85 и 0,9, приведенных в табл. 8 при $q_1 = 3$.

Таблица 14

№ варианта	B_δ, Тл	$B_{c1}=0{,}58\ B_\delta \frac{D_1}{h_{c1}} \frac{l_1}{l_{эф1}} \frac{1}{p}$, Тл	$B_{з1}=1{,}1 B_\delta \frac{t_{з1}}{b_{з1}} \frac{l_1}{l_{эф1}}$, Тл
1	0,75	$0{,}58\cdot 0{,}75\cdot\frac{35{,}0}{3{,}35}\cdot\frac{16{,}0}{12{,}1}\times\frac{1}{4}=1{,}5$	$1{,}1\cdot 0{,}75\cdot\frac{1{,}53}{1{,}05}\cdot\frac{16{,}0}{12{,}1}=1{,}6$
2	0,8	$0{,}58\cdot 0{,}8\cdot\frac{35{,}0}{3{,}35}\cdot\frac{16{,}0}{12{,}1}\cdot\frac{1}{4}=1{,}6$	$1{,}1\cdot 0{,}8\cdot\frac{1{,}53}{1{,}05}\cdot\frac{16{,}0}{12{,}1}=1{,}7$
3	0,85	$0{,}58\cdot 0{,}85\cdot\frac{35{,}0}{3{,}35}\cdot\frac{16{,}0}{12{,}1}\cdot\frac{1}{4}=1{,}7$	$1{,}1\cdot 0{,}85\cdot\frac{1{,}53}{1{,}05}\cdot\frac{16{,}0}{12{,}1}=1{,}8$

5. Задаваясь тремя вариантами значения индукции в воздушном зазоре B_δ, определяем соответствующие им индукции в спинке сердечника статора B_{c1} и в зубцах $B_{з1}$ (табл. 14).

Как следует из табл. 14, величина индукции в спинке статора и в зубцах находится в допустимых пределах при всех трех вариантах индукции в воздушном зазоре, что свидетельствует также о правильном определении числа полюсов $2p$. Поэтому в соответствии с приведенными рекомендациями принимается максимальное значение $B_\delta = 0{,}85$ Тл.

6. Определяем свободное сечение паза $Q_{с.п1}$.

Принимается пазовая изоляция из пленкоэлектрокартона на лавсане толщиной 0,27 мм и стеклолакоткани толщиной 0,17 мм; клин толщиной 4 мм; прокладки на дне паза и под клином из пленкоэлектрокартона толщиной 0,27 мм. Тогда $Q_{из1}$ составляет 112 мм².

Таким образом,

$$Q_{с.п1}=Q_{п1}-Q_{пз1}=384-112=272 \text{ мм}^2,$$

чему соответствует коэффициент свободного сечения паза

$$k_{с.с1}=\frac{Q_{с.п1}}{Q_{п1}}=\frac{272}{384}=0{,}74,$$

удовлетворяющий данным, приведенным в табл. 11.

7. Определяем число эффективных проводов в пазу $w_{эф.п1}$ при трех вариантах числа параллельных ветвей в каждой фазе (табл. 15).

В соответствии с приведенными рекомендациями принимаем $a_1=2$, чему соответствует $w_{эф.п1}=18$.

8. Задаваясь коэффициентом заполнения свободного сечения паза $k_{з.с1}=0{,}73$ (среднее значение из приведенных в табл. 11), определяем диаметр изолированного элементарного провода в эффективном проводе при трех вариантах числа m_1 (табл. 16).

Вариант 1 является неприемлемым, так как $d_{эл.и1}$ превышает максимально допустимый диаметр (⌀=2,26 мм).

Приемлемым являются варианты 2 и 3. Однако, так как при варианте 2 диаметр провода является предельным, предпочтение следует отдавать варианту 3. По этому варианту ближайший стандарт-

Таблица 15

№ варианта	a_1	$w_{эф.п1} = \frac{2{,}5pU_{ф1}a_1 10^2}{B_\delta l_1 Z_1 D_1 k_{об1}}$
1	1	$\frac{2{,}5\cdot 4\cdot \frac{500}{\sqrt{3}}\cdot 1\cdot 10^2}{0{,}85\cdot 16{,}0\cdot 72\cdot 35{,}0\cdot 0{,}945}=8{,}9$ (с округлением 9)
2	2	$\frac{2{,}5\cdot 4\cdot \frac{500}{\sqrt{3}}\cdot 2\cdot 10^2}{0{,}85\cdot 16{,}0\cdot 72\cdot 35{,}0\cdot 0{,}945}=17{,}8$ (с округлением 18)
3	4	$\frac{2{,}5\cdot 4\frac{500}{\sqrt{3}}\cdot 4\cdot 10^2}{0{,}85\cdot 16{,}0\cdot 72\cdot 35{,}0\cdot 0{,}945}=35{,}6$ (с округлением 36)

Таблица 16

№ варианта	m_1	$d_{эл.н1} = \sqrt{\frac{Q_{c.п1}\ k_{з.с1}}{m_1\ w_{эф.п1}}}$, мм
1	1	$\sqrt{\frac{272\cdot 0{,}73}{1\cdot 18}}=3{,}32$
2	2	$\sqrt{\frac{272\cdot 0{,}73}{2\cdot 18}}=2{,}34$
3	3	$\sqrt{\frac{272\cdot 0{,}73}{3\cdot 18}}=1{,}91$

ный диаметр изолированного провода 1,89 мм, чему соответствует: $d_1=1{,}81$ мм; $q_{эл1}=2{,}573$ м².

9. Определяем номинальный фазный ток статора $I_{ф1}$ при трех вариантах плотности тока — 4,5 и 6 А/мм² и соответствующие этим плотностям тока линейную нагрузку A_1 и произведение j_1A_1 (табл. 17).

Варианты 2 и 3 являются неприемлемыми, так как произведение j_1A_1 превышает допустимое значение, указанное в табл. 11.

Принимаем вариант 1, при котором $j_1=4$ А/мм²; $I_{ф1}=62$ А; $j_1A_1=1\,445$ А²/мм² · см.

10. Определяем кажущуюся мощность (кВ · А), потребляемую электродвигателем:

$$P' = \frac{3I_{ф1}U_{ф1}}{1\,000} = \frac{3\cdot 62\cdot \frac{500}{\sqrt{3}}}{1\,000} = 55.$$

Таблица 17

№ варианта	j_1, А/мм²	$I_{ф1}=j_1 a_1 m_1 q_{эл1}$, А	$A_1=\frac{I_{ф1} Z_1 w_{эф.п1}}{\pi D_1 a_1}$, А/см	$j_1 A_1$, А²/мм²·см
1	4	$4\cdot2\cdot3\cdot2{,}573=62$	$\frac{62\cdot72\cdot18}{3{,}14\cdot35{,}0\cdot2}=361$	$4\cdot361=1\,445$
2	5	$5\cdot2\cdot3\cdot2{,}573=77$	$\frac{77\cdot72\cdot18}{3{,}14\cdot35{,}0\cdot2}=455$	$5\cdot455=2\,275$
3	6	$6\cdot2\cdot3\cdot2{,}573=93$	$\frac{93\cdot72\cdot18}{3{,}14\cdot35{,}0\cdot2}=550$	$6\cdot550=3\,300$

11. Определяем номинальную мощность электродвигателя при $k_э=0{,}73$ согласно табл. 9:

$$P=P'k_э=55\cdot0{,}73=40{,}15 \text{ кВт (с округлением 40 кВт)}.$$

1-3. РАСЧЕТ ПРИ ЗАМЕНЕ МЕДНЫХ ПРОВОДОВ АЛЮМИНИЕВЫМИ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Если обмотку статора, выполненную из медного провода, заменить на обмотку из алюминиевого провода и при этом сохранить диаметр провода, число эффективных проводов в пазу, номинальное напряжение и номинальный ток, то сохраняется индукция и потери в стали и возрастают потери в обмотке.

Увеличение потерь в обмотке, вызванное повышенным удельным сопротивлением алюминия по отношению к меди, определяется следующим образом:

потери в фазе обмотки, выполненной из меди,

$$\Delta P_м=\frac{4I_{ф1м}^2\rho_м l}{\pi d_{1м}^2};$$

потери в фазе обмотки, выполненной из алюминия,

$$\Delta P_а=\frac{4I_{ф1а}^2\rho_а l}{\pi d_{1а}^2},$$

где l — длина эффективных проводов в фазе.

Отношение $\Delta P_а/\Delta P_м$ при $I_{ф1а}=I_{ф1м}$ составляет: $\Delta P_а/\Delta P_м=\rho_а/\rho_м=1{,}63$ (см. табл. 6).

Здесь и далее к обозначениям, относящимся к исполнению обмоток алюминиевым проводом, добавлен индекс «а», к исполнению обмотки медным проводом — индекс «м».

Для того чтобы сохранить неизменными потери, а следовательно, и нагрев электродвигателя, при замене медного провода алюминиевым следовало бы либо уменьшить номинальный ток, сохранив диаметр и сечение провода, либо увеличить сечение провода, оставив без изменения номинальный ток. Естественно, что в первом случае мощность электродвигателя уменьшиться, а во втором останется без изменений.

При $\Delta P_а = \Delta P_м$ и $d_{1а} = d_{1м}$ $I^2_{ф1а}\rho_а = I^2_{ф1м}\rho_м$, откуда получим:

$$\frac{I_{ф1а}}{I_{ф1м}} = \sqrt{\frac{\rho_м}{\rho_а}} = \sqrt{\frac{1}{1,63}} = 0,78,$$

т. е. номинальный ток должен быть снижен на 22% что, конечно, нежелательно.

При $\Delta P_а = \Delta P_м$ и $I_{ф1а} = I_{ф1м}$ $\frac{\rho_а}{d^2_{1а}} = \frac{\rho_м}{d^2_{1м}}$ или

$$\frac{d_{1а}}{d_{1м}} = \sqrt{\frac{\rho_а}{\rho_м}} = \sqrt{1,63} = 1,28,$$

т. е. диаметр алюминиевого провода должен на 28% превысить диаметр медного провода, что при сохранении числа витков в пазу представляется явно невозможным.

Тем не менее, как будет показано ниже, у многих электродвигателей, в особенности электродвигателей старых серий, медные обмотки могут быть заменены алюминиевыми с тем же количеством активных витков в пазу и в фазе без снижения номинальной мощности.

Рассмотрим, какие возможности имеются для достижения этой цели.

А. Повышение класса нагревостойкости изоляции

По ГОСТ 183-66 предельно допустимое превышение температуры обмотки статора электродвигателя при изоляции класса нагревостойкости Е повышается по сравнению с установленной для изоляции с нагревостойкостью класса А с 60 до 75 °С, т. е. на 15 °С.

Очевидно, что замена изоляции класса нагревостойкости А на изоляцию класса Е дает возможность повысить величину допустимых потерь в обмотке статора электродвигателя.

Примем превышение температуры обмотки статора пропорциональным величине «греющих» потерь $P_{гр}$; тогда должно быть справедливо соотношение:

$$\frac{P_{гр.в}}{P_{гр.м}}=\frac{75}{60}=1,25.$$

Но потери в обмотке статора составляют лишь часть «греющих» потерь, в состав которых входят частично и потери в стали и вентиляционные потери; обозначим эту часть «греющих» потерь в долях единицы α, остальную часть $(1-\alpha)$ составляют потери, не изменяющиеся в рассматриваемом случае. Найдем, как могут быть повышены потери в обмотке статора при переходе с изоляции нагревостойкости класса А на изоляцию класса Е.

Пусть искомое соотношение

$$\frac{(I_{ф1}^2R)_в}{(I_{ф1}^2R)_м}=x,$$

тогда справедливо уравнение

$$\frac{P_{гр.в}}{P_{гр.м}}=x\alpha+(1-\alpha)=1,25,$$

откуда

$$x=1+\frac{0,25}{\alpha}.$$

Принимая во внимание, что у современных и ранее выпущенных электродвигателей величина α не превышает 0,75, подставим в предыдущую формулу $\alpha\leqslant 0,75$, тогда $x\geqslant 1,33$.

Таким образом, потери в обмотке статора при переходе с изоляции класса А на изоляцию класса нагревостойкости Е можно повысить на 33% без снижения надежности электродвигателя.

Для этого случая

$$I_{ф1а}^2\frac{4\rho_а l}{\pi d_{1а}^2}=1,33\quad I_{ф1м}^2\frac{4\rho_м l}{\pi d_{1м}^2};$$

$$\frac{I_{ф1а}^2}{I_{ф1м}^2}=1,33\quad\frac{\rho_м}{\rho_а}\frac{d_{1а}^2}{d_{1м}^2}.$$

Подставляя из табл. 6 $\rho_м/\rho_а=0{,}61$ и извлекая квадратный корень, находим:

$$\frac{I_{ф1а}}{I_{ф1м}}=0{,}9\,\frac{d_{1а}}{d_{1м}}.$$

Таким образом, для сохранения номинальной мощности электродвигателя, т. е. для выполнения условия

$$I_{ф1а}/I_{ф1м}=1$$

при переходе с класса нагревостойкости А на класс Е, достаточно увеличить диаметр алюминиевой жилы по отношению к медной в

$$\frac{d_{1а}}{d_{1м}}=\frac{1}{0{,}9}=1{,}11 \text{ раза}.$$

Выполним такие же вычисления для случая замены меди в обмотке, имеющей изоляцию класса А, на алюминий с изоляцией класса нагревостойкости В.

По ГОСТ 183-66 для класса В допускается превышение температуры обмотки на 80 °С; отсюда

$$\frac{P_{гр.а}}{P_{гр.м}}=\frac{80}{60}=1{,}33.$$

Обозначая, как и в предыдущем случае, долю «греющих» потерь в обмотке через α и соотношение допустимых потерь в алюминиевой и медной обмотках через x, находим:

$$x=1+\frac{0{,}33}{\alpha},$$

что при $\alpha\leqslant 0{,}75$ дает $x\geqslant 1{,}47$ и соответственно

$$\frac{I_{ф1а}}{I_{ф1м}}=0{,}95\,\frac{d_{1а}}{d_{1м}}.$$

Таким образом, условием сохранения номинальной мощности электродвигателя при замене меди на алюминий (при неизменном числе активных витков в фазе) с одновременным переводом изоляции обмотки с класса А на класс В является увеличением диаметра алюминиевого провода в

$$\frac{d_{1а}}{d_{1м}}=\frac{1}{0{,}95}=1{,}05 \text{ раза}.$$

Аналогичные вычисления для случая перехода от изоляции класса нагревостойкости Е на класс нагревостойкости В дают в качестве условий сохранения номинальной мощности

$$\frac{d_{1а}}{d_{1м}} = 1,25.$$

Необходимо отметить, что последние два расчета имеют в настоящее время лишь теоретическое значение, так как алюминиевых проводов с изоляцией по классу нагревостойкости В наша кабельная промышленность пока не выпускает.

Б. Повышение диаметра (сечения) алюминиевого провода за счет увеличения коэффициента заполнения свободного сечения паза ($k_{з.сі}$)

Как указывалось выше, алюминиевые обмоточные провода являются менее жесткими, чем медные, в связи с чем можно допустить более плотную их укладку в паз. Коэффициент заполнения свободного сечения паза ($k_{з.сі}$), который для медных проводов не должен превышать 0,65—0,7, может быть повышен для алюминиевых проводов до 0,72—0,75, в связи с чем сечение алюминиевого провода может быть повышено на 7—10% и соответственно диаметр провода на 3,5—5%[1].

Учитывая, что в сортаменте круглых обмоточных проводов каждый следующий диаметр на 4—4,5% превышает предыдущий, можно приближенно считать, что при переходе с медной на алюминиевую обмотку можно применять следующий больший диаметр провода, что в среднем повышает сечение на 8%.

В. Повышение диаметра алюминиевого провода за счет более тонкой проводниковой изоляции (повышение $k_{з.пі}$)

Сортамент выпускаемых нашей промышленностью круглых алюминиевых проводов ПЭВА-2 (с эмалевой изоляцией на поливинилацетатном лаке) и ПЭЛРА-2 (на полиамиднорезольном лаке) приведен в табл. 10; в этой же таблице приведены и толщины изоляции и соответственно величина $k_{з.пі}$ (отношение площади неизолированного провода к площади квадрата, описанного вокруг изолированного провода).

Таблица 18

ПЭЛБО			ПЭВА-2 (ПЭЛРА-2)			$\frac{d_{1а}}{d_{1м}}$	$\frac{q_{1а}}{q_{1м}}$	Допустимый ток электродвигателя, % к $I_{ном}$	
$d_{1м}$, мм	$d_{из1м}$, мм	$q_{1м}$, мм²	$d_{1а}$, мм	$d_{из1а}$, мм	$q_{1а}$, мм²			Класс А	Класс Е
0,44	0,595	0,152	0,57	0,625	0,256	1,30	1,68	100,0	100
0,47	0,625	0,173	0,59	0,645	0,273	1,26	1,58	98,5	100
0,49	0,645	0,188	0,62	0,675	0,302	1,27	1,60	100,0	100
0,51	0,670	0,204	0,64	0,700	0,322	1,26	1,58	98,0	100
0,53	0,690	0,221	0,67	0,730	0,353	1,27	1,60	100,0	100
0,55	0,710	0,238	0,69	0,750	0,374	1,26	1,57	98,5	100
0,57	0,730	0,255	0,69	0,750	0,374	1,21	1,47	94,0	100
0,59	0,750	0,273	0,72	0,780	0,407	1,22	1,49	95,0	100
0,62	0,780	0,302	0,74	0,805	0,436	1,19	1,42	93,5	100
0,64	0,800	0,322	0,77	0,835	0,466	1,20	1,45	94,0	100
0,67	0,830	0,353	0,80	0,865	0,503	1,19	1,42	93,5	100
0,69	0,850	0,374	0,83	0,895	0,541	1,20	1,45	94,0	100
0,72	0,890	0,407	0,86	0,925	0,581	1,19	1,48	93,5	100
0,74	0,910	0,430	0,90	0,965	0,636	1,22	1,48	95,0	100
0,77	0,940	0,466	0,93	0,995	0,679	1,21	1,46	94,0	100
0,80	0,970	0,503	0,96	1,025	0,724	1,20	1,44	94,0	100
0,83	1,000	0,541	0,96	1,025	0,724	1,15	1,34	90,0	100
0,86	1,030	0,581	1,00	1,080	0,785	1,16	1,35	91,0	100
0,90	1,070	0,636	1,04	1,120	0,849	1,15	1,33	90,0	100
0,93	1,100	0,679	1,08	1,160	0,916	1,17	1,35	92,0	100
0,96	1,130	0,724	1,12	1,200	0,985	1,17	1,36	92,0	100
1,00	1,200	0,785	1,16	1,240	1,067	1,16	1,34	91,0	100
1,04	1,240	0,849	1,20	1,280	1,131	1,15	1,33	90,0	100
1,08	1,290	0,916	1,25	1,330	1,237	1,16	1,34	91,0	100
1,12	1,320	0,985	1,30	1,380	1,327	1,16	1,35	91,0	100
1,16	1,360	1,057	1,35	1,430	1,431	1,17	1,36	92,0	100
1,20	1,400	1,131	1,40	1,480	1,539	1,17	1,36	92,0	100
1,25	1,450	1,227	1,45	1,530	1,651	1,16	1,35	91,0	100
1,30	1,500	1,327	1,50	1,580	1,767	1,15	1,33	90,0	100
1,35	1,550	1,431	1,56	1,640	1,911	1,15	1,33	90,0	100
1,40	1,605	1,539	1,62	1,700	2,061	1,16	1,34	91,0	100
1,45	1,655	1,651	1,68	1,760	2,217	1,16	1,34	91,0	100
1,50	1,705	1,767	1,74	1,820	2,379	1,16	1,34	91,0	100
1,56	1,765	1,911	1,81	1,890	2,573	1,16	1,34	91,0	100
1,62	1,825	2,061	1,88	1,960	2,776	1,16	1,34	91,0	100
1,68	1,885	2,217	1,95	2,030	2,986	1,16	1,35	91,0	100
1,74	1,945	2,379	1,95	2,030	2,986	1,12	1,26	87,5	97,0
1,81	2,015	2,573	2,02	2,100	3,205	1,12	1,25	87,5	97,0
1,88	2,085	2,786	2,10	2,190	3,464	1,12	1,25	87,5	97,0
1,95	2,155	2,986	2,10	2,190	3,464	1,08	1,16	84,5	94,0
2,02	2,230	3,205	2,26	2,350	4,011	1,12	1,25	87,5	97,0
2,10	2,310	3,464	2,26	2,350	4,011	1,08	1,16	84,5	94,0

Таблица 19

ПБД			ПЭВА-2 (ПЭЛРА-2)			$\frac{d_{1a}}{d_{1м}}$	$\frac{q_{1a}}{q_{1м}}$	Допустимый ток электродвигателя, % к $I_{ном}$	
$d_{1м}$, мм	$d_{из1м}$, мм	$q_{1м}$, мм²	$d_{1а}$, мм	$d_{из1а}$ мм	$q_{1а}$, мм²			Класс А	Класс Е
0,38	0,60	0,113	0,57	0,625	0,255	1,50	2,26	100	100
0,41	0,63	0,132	0,59	0,645	0,273	1,44	2,07	100	100
0,44	0,66	0,152	0,64	0,700	0,322	1,45	2,12	100	100
0,47	0,69	0,173	0,67	0,730	0,353	1,43	2,06	100	100
0,49	0,71	0,189	0,69	0,750	0,374	1,41	1,98	100	100
0,51	0,73	0,204	0,69	0,750	0,374	1,35	1,83	100	100
0,53	0,75	0,221	0,72	0,780	0,407	1,36	1,84	100	100
0,55	0,77	0,232	0,74	0,805	0,430	1,35	1,81	100	100
0,57	0,79	0,255	0,77	0,835	0,466	1,35	1,83	100	100
0,59	0,81	0,273	0,77	0,835	0,466	1,31	1,71	100	100
0,62	0,84	0,302	0,80	0,865	0,503	1,29	1,66	100	100
0,64	0,86	0,322	0,83	0,895	0,541	1,30	1,68	100	100
0,67	0,89	0,353	0,86	0,925	0,581	1,28	1,65	100	100
0,69	0,91	0,374	0,90	0,965	0,636	1,30	1,70	100	100
0,72	0,94	0,407	0,93	0,995	0,679	1,29	1,67	100	100
0,74	0,96	0,430	0,93	0,995	0,679	1,26	1,58	98,5	100
0,77	0,99	0,466	0,96	1,025	0,724	1,25	1,55	98,0	100
0,80	1,02	0,503	1,00	1,080	0,785	1,25	1,56	98,0	100
0,83	1,05	0,541	1,04	1,120	0,849	1,25	1,57	98,0	100
0,85	1,08	0,581	1,08	1,160	0,916	1,26	1,58	98,5	100
0,90	1,12	0,636	1,08	1,160	0,916	1,20	1,44	94,0	100
0,93	1,15	0,679	1,12	1,200	0,985	1,21	1,45	94,5	100
0,96	1,18	0,724	1,16	1,240	1,057	1,21	1,46	94,5	100
1,00	1,27	0,785	1,25	1,330	1,227	1,25	1,56	98,0	100
1,04	1,31	0,849	1,30	1,380	1,327	1,25	1,56	98,0	100
1,08	1,35	0,916	1,35	1,430	1,431	1,25	1,56	98,0	100
1,12	1,39	0,985	1,40	1,480	1,539	1,25	1,56	98,0	100
1,16	1,43	1,057	1,40	1,480	1,539	1,21	1,46	94,5	100
1,20	1,47	1,131	1,45	1,530	1,651	1,21	1,46	94,5	100
1,25	1,52	1,227	1,50	1,580	1,767	1,20	1,44	94,0	100
1,30	1,57	1,327	1,56	1,640	1,911	1,20	1,44	94,0	100
1,35	1,62	1,431	1,62	1,700	2,061	1,20	1,44	94,0	100
1,40	1,67	1,539	1,68	1,760	2,217	1,20	1,44	94,0	100
1,45	1,72	1,651	1,74	1,820	2,379	1,20	1,44	92,0	100
1,50	1,77	1,767	1,81	1,890	2,573	1,21	1,45	94,5	100
1,56	1,83	1,911	1,81	1,890	2,573	1,16	1,35	91,0	100
1,62	1,89	2,060	1,88	1,960	2,776	1,16	1,35	91,0	100
1,68	1,95	2,220	1,95	2,030	2,986	1,16	1,35	91,0	100
1,74	2,01	2,380	2,02	2,100	3,205	1,16	1,35	91,0	100
1,81	2,08	2,570	2,10	2,190	3,464	1,16	1,35	91,0	100
1,88	2,15	2,780	2,10	2,190	3,464	1,12	1,25	87,5	97,0
1,95	2,22	2,990	2,26	2,350	4,011	1,16	1,34	91,0	100,0
2,02	2,29	3,200	2,26	2,350	4,020	1,12	1,25	87,5	97,0
2,10	2,37	3,46	2,44	2,530	4,680	1,16	1,35	91,0	100,0

Толщина изоляции медных проводов типа ПЭВ-2 и ПЭЛР-2 не отличается от приведенных в табл. 10 для алюминиевых проводов, а у проводов типа ПЭЛБО и в особенности типа ПБД толщины изоляции значительно больше и соответственно величина $k_{з.п1}$ меньше. В связи с этим замена медных проводов типов ПЭЛБО и ПБД алюминиевыми ПЭВА-2 (ПЭЛРА-2) дает возможность увеличить диаметр и сечение, как указано в табл. 18 и 19.

В табл. 18 приведены рекомендации по замене медных проводов ПЭЛБО алюминиевыми ПЭВА-2 или ПЭЛРА-2; таблица составлена так, что отношение диаметра изолированного алюминиевого провода $d_{из1а}$ к диаметру изолированного медного провода $d_{из1м}$ составляет 1,04—1,05, что, как указано выше, соответствует возможности увеличить коэффициент заполнения свободного сечения паза $k_{з.с1}$.

Таблица 19 составлена аналогично для электродвигателей старых серий, у которых были применены медные провода ПБД.

Г. Увеличение эквивалентного сечения провода за счет уменьшение числа элементарных проводников (m_1) в активном проводнике

Во многих случаях в заводском исполнении обмотки статора предусмотрено выполнение активных проводников обмотки из нескольких элементарных проводников $m_1>1$. Часто встречаются обмотки с $m_1=2$ или $m_1=3$, а иногда и обмотки с еще большим значением m_1. Например, в электродвигателе типа А51-2 на 127/220 В эффективный провод обмотки статора составлен из четырех проводников марки ПЭЛБО диаметром 1,2 мм (1,41 мм — диаметр изолированного провода). Очевидно, что замена нескольких элементарных проводников меньшим числом проводников большего диаметра при сохранении $k_{з.с1}$ — коэффициента заполнения свободного сечения паза — дает возможность уменьшить общее количество изоляции в пазу и тем самым несколько увеличить эквивалентное сечение активного проводника обмотки.

Например, если два элементарных проводника ПЭЛБО диаметром 1,00 мм (диаметр изолированного провода 1,20 мм) заменить занимающим столько же места одним проводником ПЭЛБО диаметром 1,5 мм (диаметр изолированного провода 1,705 мм), общее эквива-

лентное сечение провода увеличится с $2\times0{,}785=1{,}57$ мм^2 до 1,77 мм^2, что составляет увеличение на 12,5%.

В алюминиевых проводах с тонкой эмалевой изоляцией эффект от уменьшения числа m_1 не столь велик, однако все же составляет заметную величину.

При рассмотрении этого вопроса необходимо учесть, что применять алюминиевые провода диаметром более 2,26 (2,35 мм с изоляцией) или менее 0,8 мм не следует.

Для сохранения неизменной величины $k_{з.с1}$ необходимо при уменьшении числа параллельных элементарных проводников на меньшее число m_2 и переходе на провод большего диаметра обеспечить условие

$$m_1 d^2_{из1} = m_2 d^2_{из2},$$

где $d_{из1}$ и $d_{из2}$ — соответственно диаметры изолированного провода.

Подставляя в предыдущее уравнение вместо $d_{из2}$ величину максимально допустимого диаметра изолированного алюминиевого провода 2,35 мм, найдем минимально возможное значение числа m_2:

$$m_2 \geqslant 0{,}18\, m_1\, d^2_{из1}.$$

Вычисленное значение m_2 должно быть округлено до ближайшего большого целого числа m'_2. После этого диаметр провода увеличенного сечения находится из уравнения

$$d_{из2} = \sqrt{\frac{m_1}{m'_2}}\, d_{из1}.$$

Рассмотрим для примера обмотку, выполненную из провода ПЭВА-2 сечением 0,848 мм^2, диаметром 1,04/1,12 мм при $m_1=3$, и определим возможность уменьшения числа m_1:

$$m_2 \geqslant 0{,}18\cdot 3\cdot 1{,}12^2 = 0{,}7,$$

округляем до $m'_2=1$, тогда $d_{из2}=\sqrt{\frac{3}{1}}\cdot 1{,}12=1{,}95.$

Выбираем провод ПЭВА-2 ∅ 1,88/1,96 мм, сечение которого равно 2,78 мм^2.

Увеличение сечения составляет в этом случае

$$\frac{2{,}78-3\cdot 0{,}848}{3\cdot 0{,}848}\,100 = 9{,}3\,\%.$$

Таблица 20

Заменяемый алюминиевый провод		Заменяющий алюминиевый провод			Заменяемый алюминиевый провод		Заменяющий алюминиевый провод		
m_1	$d_{1а}/d_{из1а}$	m_2	$d_{2а}/d_{из2а}$	Увеличение сечения, %	m_1	$d_{1а}/d_{из1а}$	m_2	$d_{2а}/d_{из2а}$	Увеличение сечения, %
2	0,57/0,625	1	0,83/0,895	6	3	0,96/1,025	1	1,68/1,76	2
2	0,59/0,645	1	0,86/0,925	6	3	1,00/1,08	1	1,81/1,89	10
2	0,62/0,675	1	0,90/0,965	5	3	1,04/1,12	1	1,83/1,96	7
2	0,64/0,70	1	0,93/0,995	6	3	1,08/1,16	1	1,95/2,03	10
2	0,67/0,73	1	0,96/1,025	3	3	1,12/1,20	1	2,02/2,10	8
2	0,69/0,75	1	1,00/1,08	5	3	1,16/1,24	1	2,10/2,19	9
2	0,72/0,78	1	1,04/1,12	4	3	1,20/1,28	1	2,10/2,19	2
2	0,74/0,805	1	1,08/1,16	6	3	1,25/1,33	1	2,26/2,35	9
2	0,77/0,835	1	1,12/1,20	5	3	1,30/1,38	2	1,62/1,70	3
2	0,80/0,865	1	1,16/1,24	5	3	1,35/1,43	2	1,68/1,76	4
2	0,83/0,895	1	1,20/1,28	5	3	1,40/1,48	2	1,74/1,82	3
2	0,86/0,925	1	1,25/1,33	6	3	1,45/1,53	2	1,81/1,89	4
2	0,90/0,965	1	1,30/1,38	5	3	1,50/1,58	2	1,88/1,96	5
2	0,93/0,995	1	1,35/1,43	5	3	1,56/1,64	2	1,95/2,03	5
2	0,96/1,025	1	1,40/1,48	6	3	1,62/1,70	2	2,02/2,10	4
2	1,00/1,08	1	1,45/1,53	5	3	1,68/1,76	2	2,10/2,19	4
2	1,04/1,12	1	1,50/1,58	5	3	1,74/1,82	2	2,10/2,19	—
2	1,08/1,16	1	1,56/1,64	6	3	1,81/1,89	2	2,26/2,35	4
2	1,12/1,20	1	1,62/1,70	5	4	0,77/0,835	2	1,62/1,70	10
2	1,16/1,24	1	1,68/1,76	5	4	0,80/0,865	1	1,68/1,76	10
2	1,20/1,28	1	1,74/1,82	6	4	0,83/0,895	1	1,74/1,82	10
2	1,25/1,33	1	1,81/1,89	6	4	0,86/0,925	2	1,25/1,33	6
3	1,30/1,38	1	1,88/1,96	5	4	0,90/0,965	1	1,88/1,96	9
3	1,35/1,43	1	1,95/2,03	5	4	0,93/0,995	1	1,95/2,03	10
3	1,40/1,48	1	2,02/2,10	4	4	0,96/1,025	2	1,40/1,48	6
3	1,45/1,53	1	2,10/2,19	6	4	1,00/1,08	1	2,1/2,19	10
3	1,50/1,58	1	2,10/2,19	6	4	1,04/1,12	2	1,50/1,58	5
3	1,56/1,64	1	2,26/2,35	6	4	1,08/1,16	1	2,26/2,35	10
3	0,57/0,625	1	1,00/1,08	3	4	1,12/1,20	2	1,62/1,70	5
3	0,59/0,645	1	1,04/1,12	3	4	1,16/1,24	2	1,68/1,76	5
3	0,62/0,675	1	1,08/1,16	—	4	1,20/1,28	2	1,74/1,82	6
3	0,64/0,70	1	1,12/1,20	2	4	1,25/1,33	2	1,81/1,89	6
3	0,67/0,73	1	1,20/1,28	6	4	1,30/1,38	2	1,88/1,96	5
3	0,69/0,75	1	1,20/1,28	—	4	1,35/1,43	2	1,95/2,03	5
3	0,72/0,78	1	1,25/1,33	—	4	1,40/1,48	2	2,02/2,10	2
3	0,74/0,805	1	1,30/1,38	—	4	1,45/1,53	2	2,10/2,19	6
3	0,77/0,835	1	1,35/1,43	3	4	1,50/1,58	3	1,74/1,82	1
3	0,80/0,865	1	1,40/1,48	3	4	1,56/1,64	2	2,26/2,35	6
3	0,83/0,895	1	1,50/1,58	9	5	0,77/0,835	1	1,81/1,89	10
3	0,86/0,925	1	1,50/1,58	2	5	0,80/0,865	1	1,88/1,96	10
3	0,90/0,965	1	1,62/1,70	8	5	0,83/0,895	1	1,95/2,03	14
3	0,93/0,995	1	1,62/1,70	1	5	0,86/0,925	2	1,40/1,48	5

Заменяемый алюминиевый провод		Заменяющий алюминиевый провод			Заменяемый алюминиевый провод		Заменяющий алюминиевый провод		
m_1	$d_{1а}/d_{из1а}$	m_2	$d_{2а}/d_{из2а}$	Увеличение сечения, %	m_1	$d_{1а}/d_{из1а}$	m_2	$d_{2а}/d_{из2а}$	Увеличение сечения, %
5	0,90/0,965	1	2,10/2,19	9	5	1,62/1,70	3	2,10/2,19	1
5	0,93/0,995	2	1,50/1,58	4	6	0,77/0,835	2	1,35/1,43	3
5	0,96/1,025	1	2,26/2,35	11			3	1,12/1,20	5
5	1,00/1,08	2	1,62/1,70	5	6	0,8/0,865	2	1,40/1,48	3
5	1,04/1,12	2	1,68/1,76	5			3	1,16/1,24	5
5	1,08/1,16	2	1,74/1,82	5	6	0,83/0,895	2	1,50/1,58	9
5	1,12/1,20	2	1,81/1,89	5			3	1,20/1,28	5
5	1,16/1,24	2	1,88/1,96	5	6	0,86/0,925	3	1,25/1,33	6
5	1,20/1,28	2	1,95/2,03	6	6	0,90/0,965	2	1,62/1,70	8
5	1,25/1,33	2	2,02/2,10	4			3	1,30/1,38	5
5	1,30/1,38	2	2,10/2,19	4	6	0,93/0,995	3	1,35/1,43	5
5	1,35/1,43	3	1,81/1,89	8			2	1,62/1,70	1
5	1,40/1,48	2	2,26/2,35	5	6	0,96/1,025	2	1,68/1,76	2
5	1,45/1,53	3	1,88/1,96	1			3	1,40/1,48	6
5	1,50/1,58	3	1,95/2,03	1	6	1,00/1,68	2	1,81/1,89	10
5	1,56/1,64	3	2,02/2,10	1			3	1,45/1,53	5

В табл. 20 показано, как можно заменять алюминиевые провода разных размеров при $m_1>1$ и какое увеличение сечения можно получить за счет уменьшения числа m_1.

Для электродвигателей серии А и АО, являющихся в настоящее время значительной частью ремонтного фонда электродвигателей в диапазоне 0,6—100 кВт, обмоточные данные при замене медных проводов алюминиевыми приведены в табл. 21, а схемы соединения — на рис. 3-30.

Как видно из табл. 18—20, использование алюминиевых проводов ПЭВА-2 и ПЭЛРА-2 повышенного сечения с одновременным переходом на изоляцию класса нагревостойкости Е обеспечивает сохранение номинальной мощности электродвигателей почти во всех случаях. При сохранении изоляции класса А во многих случаях потребовалось бы снижение допустимого тока статора на 10—15%.

При отсутствии требуемого согласно табл. 19—20 провода он может быть заменен двумя проводами эквивалентного суммарного сечения (табл. 22). Естественно, что при этой замене следует проверить величину коэффици-

Тип	Паспортные данные						
	P, кВт	U, В	I, А	n, об/мин	η, %	cos φ	$\frac{D_{н1}}{D_1}$, см
1	2	3	4	5	6	7	8

Электродвигатели

А31/2А и АО31/2А	1,0	127/220 220/380 500	6,6/3,8 3,8/2,2 1,7	2 850	79,0	0,86	145/82
А32/2А и АО32/2А	1,7	127/220 220/380 500	11,1/6,4 6,4/3,7 2,8	2 850	81,5	0,87	145/82
А31/4А и АО31/4А	0,6	127/220 220/380 500	4,8/2,8 2,8/1,6 1,2	1 410	74,0	0,76	145/89
А32/4А и АО32/4А	1,0	127/220 220/380 500	7,3/4,2 4,2/2,4 1,9	1 410	78,5	0,79	145/89
А31/6А и АО31/6А	0,4	127/220 220/380 500	3,8/2,25 2,25/1,3 1,0	935	70,0	0,67	145/89
А32/6А и АО32/6А	0,6	127/220 220/380 500	5,35/3,1 3,1/1,8 1,35	930	74,0	0,69	145/89

Электродвигатели

А41/2А и АЛ41/2А	2,8	127/220 220/380 500	18,1/10,4 10,4/6,0 4,6	2 870	81,5	0,86	182/104
АО41/2А	1,7	127/220 220/380 500	10,7/6,2 6,2/3,6 2,8	2 880	81,5	0,87	182/104
АО42/2А и АЛ42/2А	4,5	127/220 220/380 500	28,4/16,4 16,4/9,5 7,2	2 870	83,5	0,86	182/104
АО42/2А и АОЛ42/2А	2,8	127/220 220/380 500	18,2/10,5 10,5/6,1 4,6	2 880	81,5	0,86	182/104
А-АЛ41/4А и АО-АОЛ41/4А	1,7	127/220 220/380 500	11,6/6,7 6,7/3,9 2,9	1 420	81,5	0,82	182/112

Таблица 21

Конструктивные данные						Обмотка статора				
l_1, см	δ, мм	$\frac{Z_1}{Z_2}$	$Q_{п1}$, мм²	$y_{п1}$	$\omega_{эф.п1}$	m_1	a_1	d_1, мм	G, кг	№ рис.
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
3-го габарита										
64	0,35	24/20	99,8	1—12 2—11	42 73 96	1 1 1	1 1 1	1,0 0,77 0,67	0,53 0,54 0,55	3 3 3
100	0,35	24/20	99,8	1—12 2—11	28 49 64	1 1 1	1 1 1	1,25 0,93 0,83	0,64 0,61 0,65	3 3 3
64	0,25	24/18	112,3	1—8 2—7	63 110 145	1 1 1	1 1 1	0,9 0,67 0,59	0,52 0,5 0,51	4 4 4
100	0,25	24/18	112,3	1—8 2—7	44 76 100	1 1 1	1 1 1	1,04 0,83 0,72	0,58 0,62 0,63	4 4 4
64	0,25	36/26	110,0	1—8 2—7	72 125 164	1 1 1	1 1 1	0,86 0,67 0,57	0,72 0,765 0,734	5 5 5
100	0,25	36/26	110,0	1—8 2—7	47 81 107	1 1 1	1 1 1	1,08 0,83 0,69	0,897 0,915 0,867	5 5 5
4-го габарита										
75	0,5	24/20	147,3	1—12 2—11	27 47 62	1 1 1	1 1 1	1,62 1,3 1,12	1,1 1,24 1,23	3 3 3
75	0,5	24/20	147,3	1—12 2—11	31 53 70	2 1 1	1 1 1	1,04 1,12 0,93	1,07 1,07 0,97	3 3 3
115	0,5	24/20	147,3	1—12 1—11	18 31 41	3 1 1	1 1 1	1,16 1,56 1,4	1,3 1,33 1,43	3 3 3
115	0,5	24/20	147,3	1—12 2—11	22 33 50	3 1 1	1 1 1	0,93 1,3 1,12	1,04 1,17 1,15	3 3 3
75	0,3	36/26	125,8	1—12 2—11 3—10	31 53 70	1 1 1	1 1 1	1,45 1,08 0,93	1,48 1,54 1,36	6 6 6

Тип	Паспортные данные						
	P, кВт	U, В	I, А	n, об/мин	η, %	cos φ	$\frac{D_{н1}}{D_1}$, см
1	2	3	4	5	6	7	8
А-АЛ42/4А и АО-АОЛ42/4А	2,8	127/220 220/380 500	19,1/11,0 11,0/6,4 4,8	1 420	81,0	0,82	182/112
А-АЛ41/6А и АО-АОЛ41/6А	1,0	127/220 220/380 500	8,2/4,8 4,8/2,8 2,1	930	77,0	0,72	182/112
А-АЛ42/6А и АО-АОЛ42/6А	1,7	127/220 220/380 500	13,8/8,0 8,0/4,6 3,5	930	76,5	0,73	182/112

Электродвигатели

А51/2А	7,0	127/220 220/380 500	41,0/24,0 24,0/13,8 10,5	2 890	87,0	0,89	245/140
АО51/2А	4,5	127/220 220/380 500	27,0/15,6 15,6/9,1 6,9	2 900	85,5	0,88	245/140
А52/2А	10,0	127/220 220/380 500	58,5/33,8 33,8/19,5 15,0	2 890	87,5	0,89	245/140
АО52/2А	7,0	127/220 220/380 500	42,8/24,7 24,7/14,3 10,8	2 900	85,5	0,87	245/140
А51/4А и АО51/4А	4,5	127/220 220/380 500	28,2/16,3 16,3/9,4 7,2	1 440	85,5	0,85	245/152
А52/4А и АО52/4А	7,0	127/220 220/380 500	42,6/24,6 24,6/14,2 10,8	1 440	87,0	0,86	245/152

Конструктивные данные						Обмотка статора				
l_1, см	δ, мм	$\frac{Z_1}{Z_2}$	$Q_{п1}$, мм²	$y_{п1}$	$w_{эф.п1}$	m_1	a_1	d_1, мм	G, кг	№ рис.
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
115	0,3	36/26	125,8	1—12 2—11 3—10	20 36 46	2 1 1	1 1 1	1,3 1,4 1,16	1,48 1,54 1,36	6 6 6
75	0,3	36/26	125,8	1—8 2—7	44 76 100	1 1 1	1 1 1	1,2 0,93 0,8	1,0 1,04 1,025	5 5 5
115	0,3	36/26	125,8	1—8 2—7	29 50 66	1 1 1	1 1 1	1,56 1,16 1,0	1,33 1,29 1,27	5 5 5
5-го габарита										
90	0,6	24/20	266/5	1—10	18 32 42	4 2 2	1 1 1	1,35 1,4 1,2	2,4 2,29 2,23	8 8 8
90	0,6	24/20	266,5	1—10	18 32 42	4 2 2	1 1 1	1,35 1,4 1,2	2,4 2,29 2,23	8 8 8
140	0,6	24/20	266,5	1—10	12 20 26	4 3 2	1 1 1	1,56 1,4 1,5	2,43 2,47 2,44	8 8 8
140	0,6	24/20	266,5	1—10	16 26 34	4 3 2	1 1 1	1,5 1,35 1,45	3,02 2,98 2,99	8 8 8
90	0,4	36/26	206,5	1—12 2—11 3—10	18 32 42	3 2 1	1 1 1	1,5 1,35 1,68	2,88 2,77 2,6	6 6 6
140	0,4	36/26	206,5	1—12 2—11 3—10	25 22 29	2 2 2	2 1 1	1,4 1,5 1,3	2,73 2,75 2,73	7 6 6

Тип	Паспортные данные						
	P, кВт	U, В	I, А	n, об/мин	η, %	cos φ	$\frac{D_{н1}}{D_1}$, см
1	2	3	4	5	6	7	8
А51/6А и АО51/6А	2,8	127/220 220/380 500	19,7/11,4 11,4/6,6 5,0	950	82,5	0,78	245/152
А52/6А и АО52/6А	4,5	127/220 220/380 500	30,3/17,5 17,5/10,1 7,7	950	84,5	0,80	245/152

Электродвигатели

А61/2А	14	220/380 500	49,5/28,5 21,5	2 920	86,0	0,87	327/180
А62/2А	20	220/380 500	68,7/39,8 30,2	2 920	87,0	0,88	327/180
А61/4А	10	220/380 500	35,6/20,6 15,6	1 450	86,0	0,86	327/200
А62/4А	14	220/380 500	49/28,4 21,6	1 450	87,0	0,86	327/200
А61/6А	7	220/380 500	27,9/16,1 12,2	970	83,5	0,79	327/200
А62/6А	10	220/380 500	38,8/22,4 17,0	970	84,5	0,80	327/200
А61/8А	4,5	220/380 500	19,7/11,4 8,7	730	81,0	0,74	327/230
А62/8А	7,0	220/380 500	29,2/16,9 12,8	730	83,0	0,76	327/230

Конструктивные данные						Обмотка статора				
l_1, см	δ, мм	$\frac{Z_1}{Z_2}$	$Q_{п1}$, мм²	$y_{п1}$	$w_{эф.п1}$	m_1	a_1	d_1, мм	G, кг	№ рис.
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
90	0,4	36/44	206,5	1—8 2—7	27 47 62	2 1 1	1 1 1	1,4 1,5 1,3	2,05 2,04 2,03	5 5 5
140	0,4	36/44	206,5	1—8 2—7	17 30 40	3 2 1	1 1 1	1,45 1,35 1,68	2,5 2,55 2,61	5 5 5
6-го габарита										
75	0,75	36/26	335	1—13	18 24	4 3	1 1	1,4 1,4	4,66 4,66	9 9
100	0,75	36/28	335	1—13	28 36	2 2	2 2	1,56 1,4	4,75 4,95	10 10
75	0,55	36/46	296	1—8	28 36	2 2	1 1	1,56 1,4	3,11 3,25	11 11
100	0,55	36/46	296	1—8	20 26	2 2	1 1	1,88 1,62	3,48 3,38	11 11
75	0,55	36/46	296	1—6	36 46	2 1	1 1	1,4 1,74	2,85 2,78	12 12
100	0,4	36/46	296	1—6	54 36	1 2	2 1	1,68 1,4	3,35 3,14	13 12
75	0,4	54/58	247	1—7	32 42	2 1	1 1	1,35 1,68	3,38 3,41	14 14
100	0,4	54/58	247	1—7	24 32	2 2	1 1	1,56 1,35	3,72 3,74	14 14

Тип	Паспортные данные						
	P, кВт	U, В	I, А	n, об/мин	η, %	cos φ	$D_{н1}$, D_1, см
1	2	3	4	5	6	7	8

Электродвигатели

А71/2А	28	220/380 500	95,5/55,2 42,0	2 930	87,5	0,88	368/205
А72/2А	40	220/380 500	137/77 58,5	2 930	88,5	0,89	368/205
А71/4А	20	220/380 500	69,7/40,3 30,7	1 450	87,5	0,86	368/230
А72/4А	28	220/380 500	96,5/55,8 42,5	1 450	88,5	0,86	368/230
А71/6А	14	220/380 500	53,3/30,8 23,4	970	85,0	0,81	368/260
А72/6А	20	220/380 500	74/42,8 32,5	970	86,5	0,82	368/260
А71/8А	10	220/380 500	40,5/23,5 17,8	730	83,0	0,78	368/260
А72/8А	14	220/380 500	55/31,8 24,1	730	84,5	0,79	368/260

Электродвигатели

А81/2А	55	220/380 500	181/105 79,7	2 930	89,5	0,89	423/240
А82/2А	75	220/380 500	235/136 104	2 930	91,0	0,92	423/240
А81/4А	40	220/380 500	131/76 57,5	1 460	90,5	0,89	423/265
А82/4А	55	220/380 500	178/103 78,5	1 460	91,0	0,89	423/265

Конструктивные данные						Обмотка статора				
l_1, см	δ, мм	$\frac{Z_1}{Z_2}$	$Q_{п1}$, мм²	$y_{п1}$	$w_{эф.п1}$	m_1	a_1	d_1, мм	G, кг	№ рис.
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
7-го габарита										
100	0,85	36/28	416	1—13	24 32	3 2	2 2	1,62 1,68	7,03 6,7	10 10
135	0,85	36/28	416	1—13	18 24	3 3	2 2	1,88 1,62	7,6 7,55	10 10
100	0,5	36/44	370	1—8	34 44	2 2	2 2	1,56 1,35	4,77 4,65	15 15
135	0,5	36/44	370	1—8	26 34	2 2	2 2	1,88 1,62	5,77 5,64	15 15
100	0,45	54/44	291	1—8	46 60	1 1	3 3	1,68 1,45	4,82 4,71	16 16
135	0,45	54/44	291	1—8	38 50	1 1	3 3	1,88 1,62	5,52 5,43	16 16
100	0,45	54/58	248	1—7	20 26	2 2	1 1	1,81 1,56	4,46 4,33	14 14
135	0,45	54/58	248	1—7	30 20	2 2	2 1	1,45 1,81	4,86 5,0	17 14
8-го габарита										
130	1,4	36/28	519	1—14	16 21	5 4	2 2	1,88 1,81	14,0 13,7	18 18
180	1,4	36/28	519	1—14	14 18	7 4	2 2	1,68 1,95	14,9 14,7	18 18
130	0,6	48/58	387	1—11	16 22	4 3	2 2	1,74 1,74	10,08 10,4	19 19
180	0,6	48/58	387	1—11	24 16	2 4	4 2	2,02 1,74	11,15 11,1	20 19

Тип	Паспортные данные						
	P, кВт	U, В	I, А	n, об/мин	η, %	cos φ	$\frac{D_{н1}}{D_1}$, см
1	2	3	4	5	6	7	8
А81/6А	28	220/380 500	97,5/56,5 43,0	975	89,0	0,85	423/300
А82/6А	40	220/380 500	137/79,5 60,4	975	89,0	0,86	423/300
А81/8А	20	220/380 500	76,2/44,1 33,5	730	86,0	0,80	423/300
А82/8А	28	220/380 500	102/59 44,7	730	87,0	0,83	423/300

Электродвигатели

А91/2А	100	220/380 500	322/186 141,5	2 950	90,5	0,90	493/285
А92/2А	125	220/380 500	400/232 176	2 950	91,0	0,90	493/285
А91/4А	75	220/380 500	242/140 106	1 460	91,5	0,89	493/315
А92/4А	100	220/380 500	320/185 141	1 460	92,0	0,89	83/315
А91/6А	55	220/380 500	183/106 80	980	91,0	0,87	493/350
А92/6А	75	220/380 500	249/144 109	980	91,0	0,87	493/350
А91/8А	40	220/380 500	142/82,2 62,5	730	89,0	0,83	493/350
А92/8А	55	220/380 500	193/112 85	730	90,0	0,83	493/350

Примечания: 1. Марка обмоточного провода — ПЭВА-2 или ПЭЛРА-2.

2. Тип обмотки: однослойная для всех электродвигателей 3-го и 4-го габаритов и электродвигателей 6—9-го габаритов и двухполюсных электродвигателей 5-го габарита,

Конструктивные данные						Обмотка статора				
l_1, см	δ, мм	$\frac{Z_1}{Z_2}$	$Q_{п1}$, мм²	$y_{п1}$	$w_{эф.п1}$	m_1	a_1	d_1, мм	G, кг	№ рис.
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
130	0,55	72/58	271	1—11	24 22	2 2	3 2	1,68 1,74	9,2 9,03	21 22
180	0,55	72/58	271	1—11	18 24	2 2	3 3	1,95 1,68	10,3 10,3	21 21
130	0,55	72/58	271	1—8	22 14	2 3	2 1	1,81 1,81	8,25 7,88	23 24
180	0,55	72/58	271	1—8	16 22	2 2	2 2	2,02 1,74	8,47 8,7	23 23
9-го габарита										
160	2,0	48/40	577	1—18	9 12	7 7	2 2	2,1 1,95	22,6 25,0	25 25
220	2,0	48/40	577	1—18	7 9	10 8	2 2	2,1 2,1	27,2 27,9	25 25
160	1,0	60/50	465	1—14	20 26	3 3	4 4	2,02 1,74	18,9 18,35	26 26
220	1,0	60/50	465	1—14	16 21	4 3	4 4	1,95 1,95	20,8 20,4	26 26
160	0,6	72/58	363	1—11	34 44	1 1	6 6	2,26 1,95	13,0 20,4	27 27
220	0,6	72/58	363	1—12	24 32	3 3	6 6	1,56 1,35	15,0 15,1	28 28
160	0,6	72/58	363	1—9	28 18	2 3	4 2	1,81 1,81	11,95 11,5	29 30
220	0,6	72/58	363	1—9	20 26	3 2	4 4	1,74 1,88	13,6 13,7	29 29

для четырех-шестиполюсных электродвигателей 5-го габарита; двухслойная для всех

d, мм	1,00	1,04	0.08	1,12	1,16	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,44	0,9	—	1,0	1,04	1,08	1,12	—	—	—	—	—
0,47	—	0,93	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,49	—	—	—	—	—	—	1,16	—	—	—	—
0,51	0,86	—	0,96	1,0	—	—	—	1,2	—	—	—
0,53	—	0,9	—	—	1,04	1,08	—	—	1,25	—	—
0,55	0,83	—	0,93	—	—	—	1,12	—	—	—	—
0,57	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,59	0,8	0,86	0,9	0,96	1,0	1,04	—	1,16	—	—	—
0,62	0,77	0,83	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,64	—	—	0,86	0,98	0,96	—	1,08	—	1,2	1,25	—
0,67	0,74	0,8	—	—	—	1,0	—	1,12	—	—	1,3
0,69	0,72	0,77	0,83	0,9	0,93	—	1,04	—	1,16	—	—
0,72	0,69	0,74	0,8	0,86	—	0,96	—	—	—	—	—
0,74	—	0,72	—	0,83	0,9	—	—	1,08	1,12	1,2	1,25
0,77	—	—	0,77	0,8	0,86	0,93	1,0	—	—	—	—
0,8	—	—	—	0,77	0,83	0,9	0,96	1,04	—	1,16	—
0,83	—	—	—	—	0,8	0,86	0,93	1,0	1,08	1,12	1,2
0,86	—	—	—	—	—	0,83	0,9	0,96	1,04	—	1,16
0,9	—	—	—	—	—	—	0,86	—	1,00	1,08	—
0,93	—	—	—	—	—	—	—	0,93	—	1,04	1,12
0,96	—	—	—	—	—	—	—	—	0,96	1,00	1,08
1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,96	1,04
1,04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,0
1,08	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. При замене провода, диаметр которого указан в верхнем горизон метром, второй—по горизонтали влево от него в первом вертикальном столбце. Напри ⌀ 1,12 + ⌀ 0,67 мм и т. д.

Таблица 22

1,5	1,56	1,62	1,68	1,74	1,81	1,88	1,95	2,02	2,1	2,26
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,35	1,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	1,45	1,5	—	—	—	—	—	—	—
1,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	1,35	1,4	—	1,56	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,25	1,3	—	1,45	—	—	—	—	—	—	—
—	—	1,35	—	1,5	—	—	1,74	—	—	—
1,2	1,2	1,25	—	—	1,56	1,68	—	—	—	—
1,16	—	1,3	1,4	1,45	—	—	—	—	—	—
1,12	1,2	—	—	—	1,5	—	1,68	—	—	—
1,08	1,16	1,25	—	1,4	—	1,62	1,62	1,74	—	2,02
1,04	1,12	1,2	1,3	1,35	1,45	—	—	—	1,81	—
—	1,08	1,16	1,25	—	—	1,56	—	1,68	—	—
—	—	1,12	—	1,3	1,4	—	1,56	—	—	1,93
—	—	—	1,2	1,25	1,35	1,5	—	1,62	1,74	1,88
—	—	—	—	1,2	1,3	1,45	1,5	—	1,68	—
—	—	—	—	—	1,25	1,4	1,45	1,56	—	—
—	—	—	—	—	—	1,35	1,4	1,5	1,62	1,81
—	—	—	—	—	—	—	1,35	1,45	1,56	—
—	—	—	—	—	—	—	—	1,4	1,5	1,74
—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,45	1,68
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,62

тальном ряду, двумя другими один берется из вертикального столбца под данным диа-
мер, провод ⌀ 1,3 мм заменяется проводами ⌀ 1,2 + ⌀ 0,51 или ⌀ 1,16 + ⌀ 0,59 или

ента заполнения свободного сечения паза и при необходимости внести соответствующие изменения в расчет обмотки.

Следует отметить, что понижение допустимого тока статора вызывает большее снижение мощности электро-

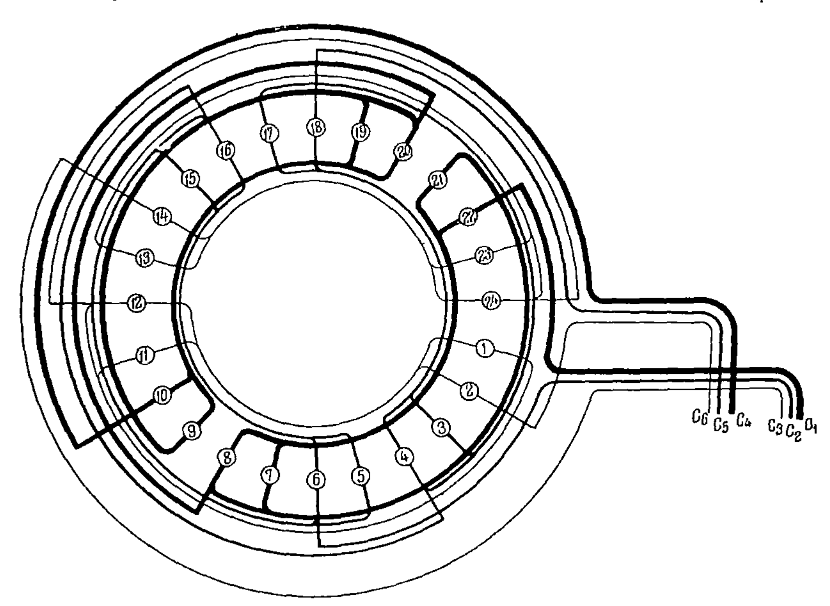


Рис. 3. Схема однослойной обмотки.
$2p=2$; $Z_1=24$; $q_1=4$; $a_1=1$.

двигателя. Между соотношением мощностей $P_а/P_м$ и допустимых токов статора $I_{ф1а}/I_{ф1м}$ электродвигателя с алюминиевой или медной обмоткой при неизменном числе эффективных проводов в пазу имеется зависимость:

$$\frac{P_а}{P_м}=\sqrt{\frac{\left(\frac{I_{ф1а}}{I_{ф1м}}\right)^2+\cos^2\varphi_м-1}{\cos\varphi_м}},$$

где $\cos\varphi_м$ — номинальный коэффициент мощности электродвигателя.

Вывод приведенной формулы основан на совместном решении двух приближенных уравнений

$$\frac{P_а}{P_м}\approx\frac{I_{ф1а}\cos\varphi_а}{I_{ф1м}\cos\varphi_м} \text{ и } I_{ф1а}\sin\varphi_а\approx I_{ф1м}\sin\varphi_м.$$

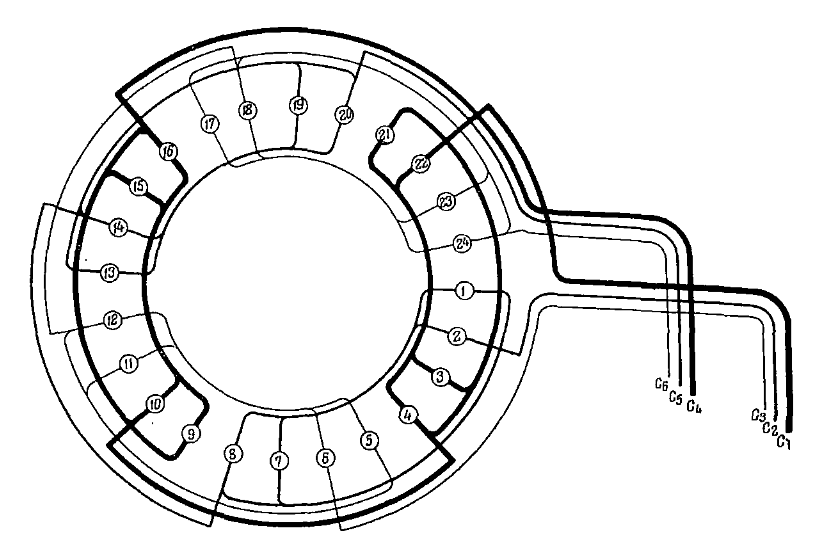


Рис. 4. Схема однослойной обмотки.
$2p=4$; $Z_1=24$; $q_1=2$; $a_1=1$.

Рис. 5. Схема однослойной обмотки.
$2p=6$; $Z_1=36$; $q_1=2$; $a_1=1$.

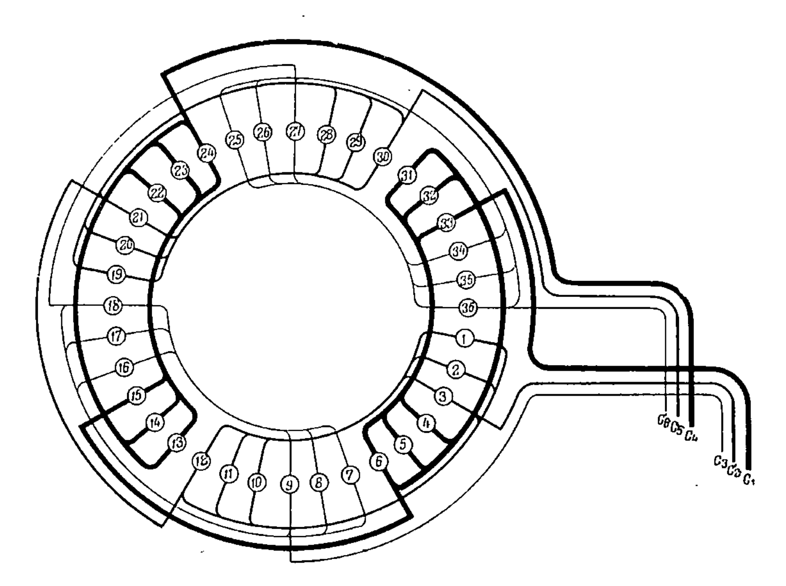


Рис. 6. Схема однослойной обмотки.
$2p=4$; $Z_1=36$; $q_1=3$; $a_1=1$.

Рис. 7. Схема однослойной обмотки,
$2p=4$; $Z_1=36$; $q_1=3$; $a_1=2$.

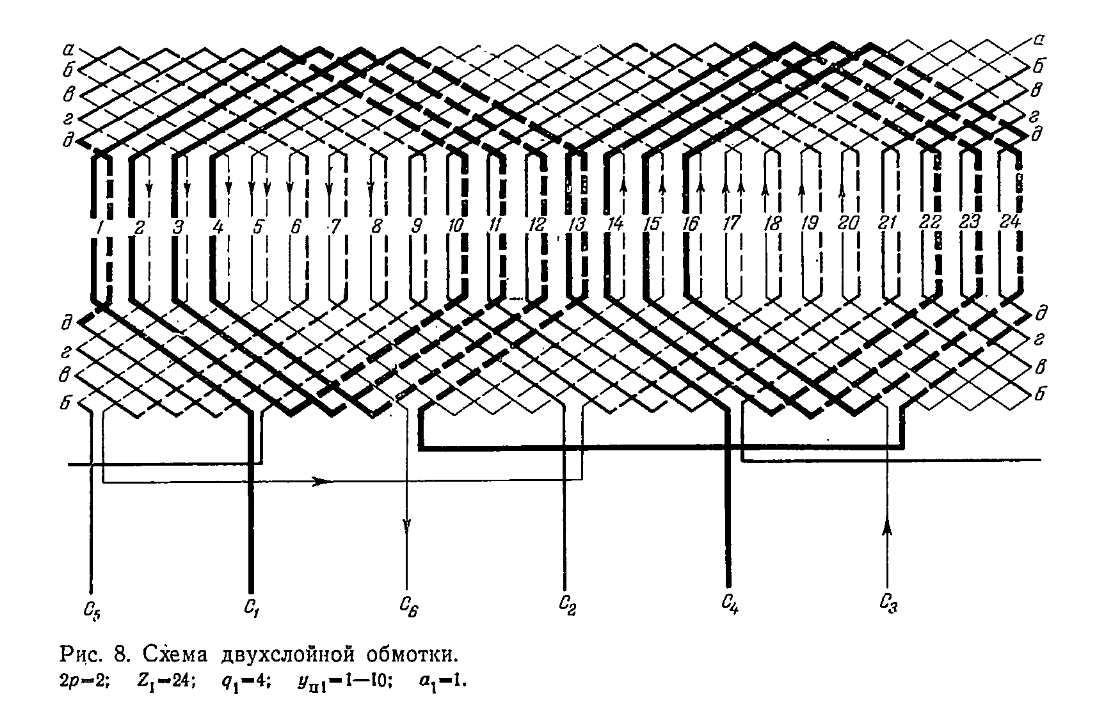


Рис. 8. Схема двухслойной обмотки.
$2p=2$; $Z_1=24$; $q_1=4$; $y_{\text{п}1}=1—10$; $a_1=1$.

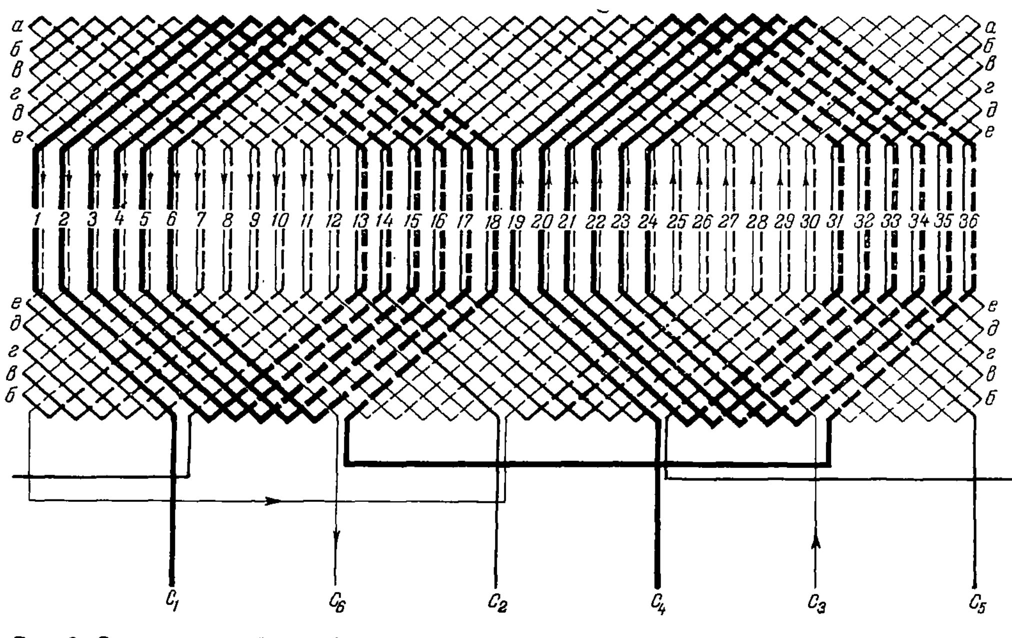


Рис. 9. Схема двухслойной обмотки.
$2p=2$; $Z_1=36$; $q_1=6$; $y_{п1}=1-13$; $a_1=1$.

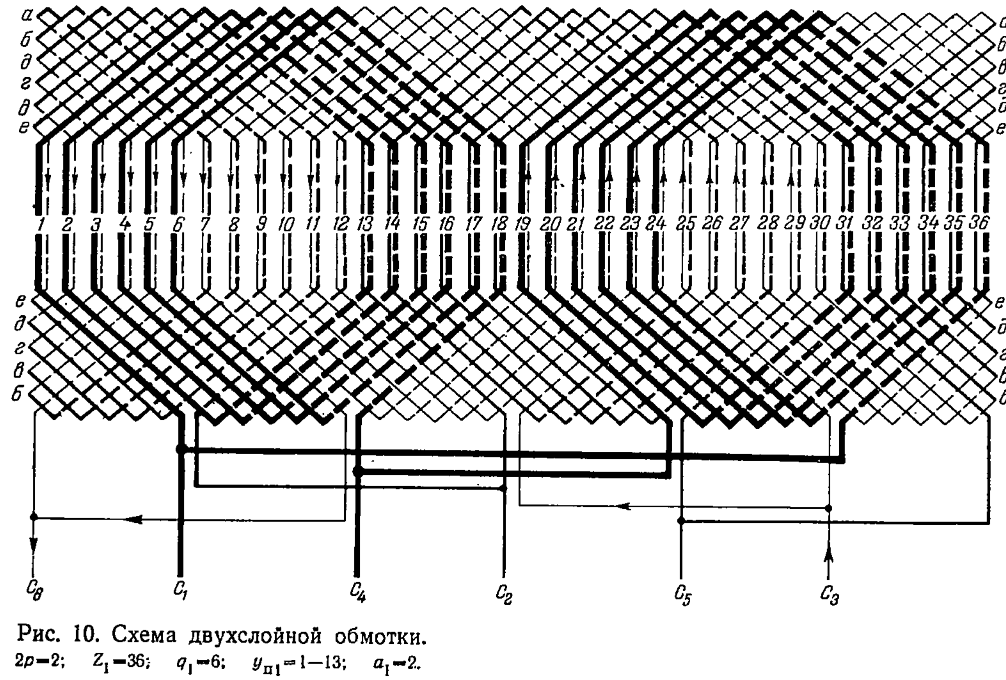


Рис. 10. Схема двухслойной обмотки.
$2p=2$; $Z_1=36$; $q_1=6$; $y_{п1}=1-13$; $a_1=2$.

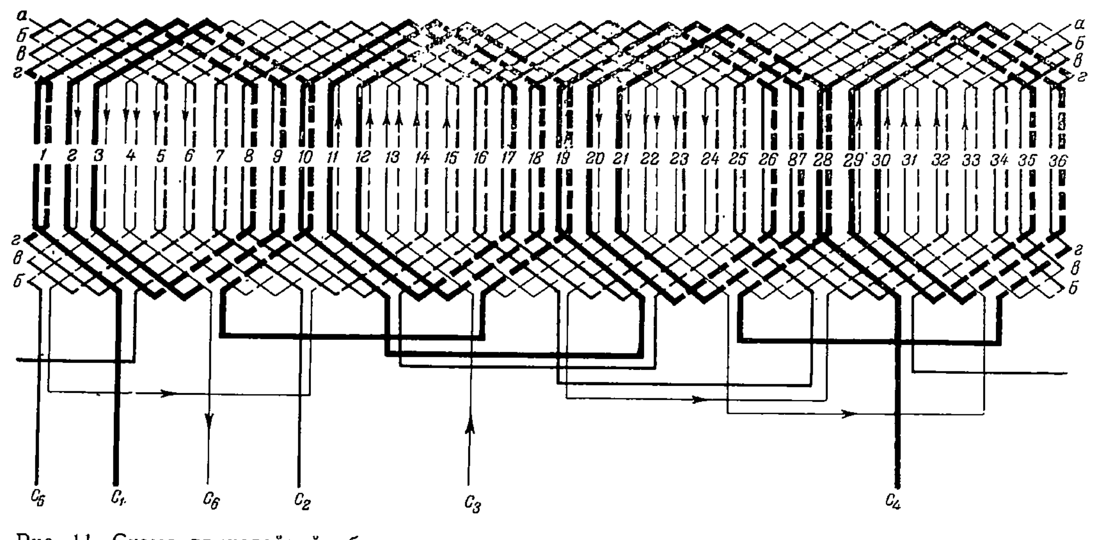


Рис. 11. Схема двухслойной обмотки.

$2p=4$; $Z_1=36$; $q_1=3$; $y_{п1}=1—8$; $a=1$.

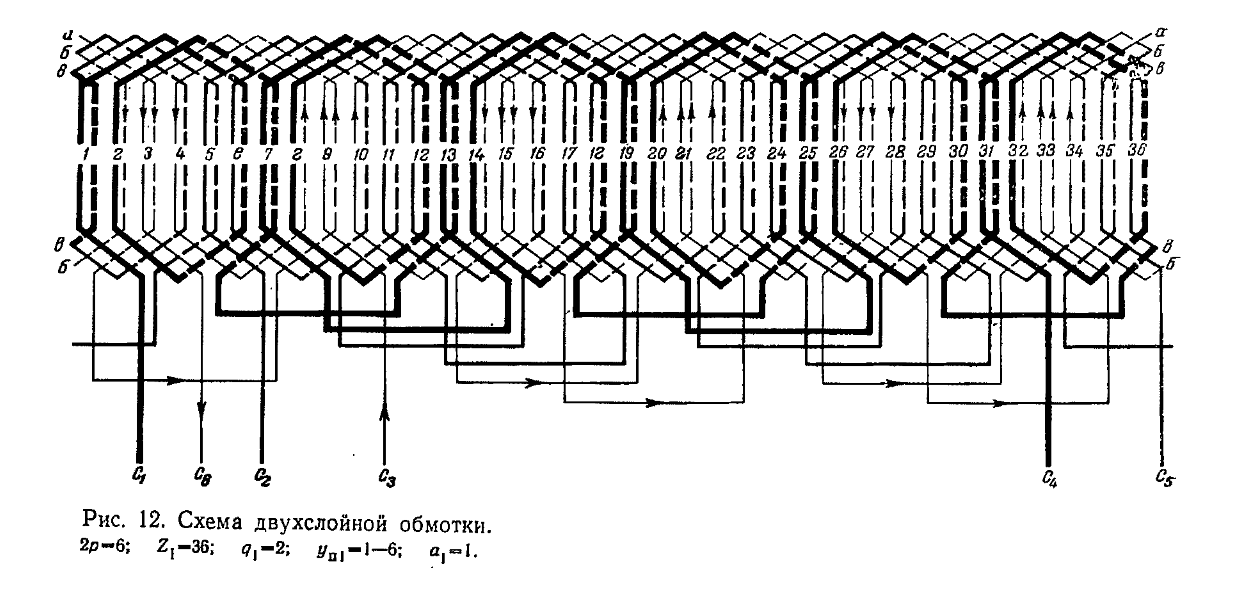


Рис. 12. Схема двухслойной обмотки.
$2p=6$; $Z_1=36$; $q_1=2$; $y_{п1}=1-6$; $a_1=1$.

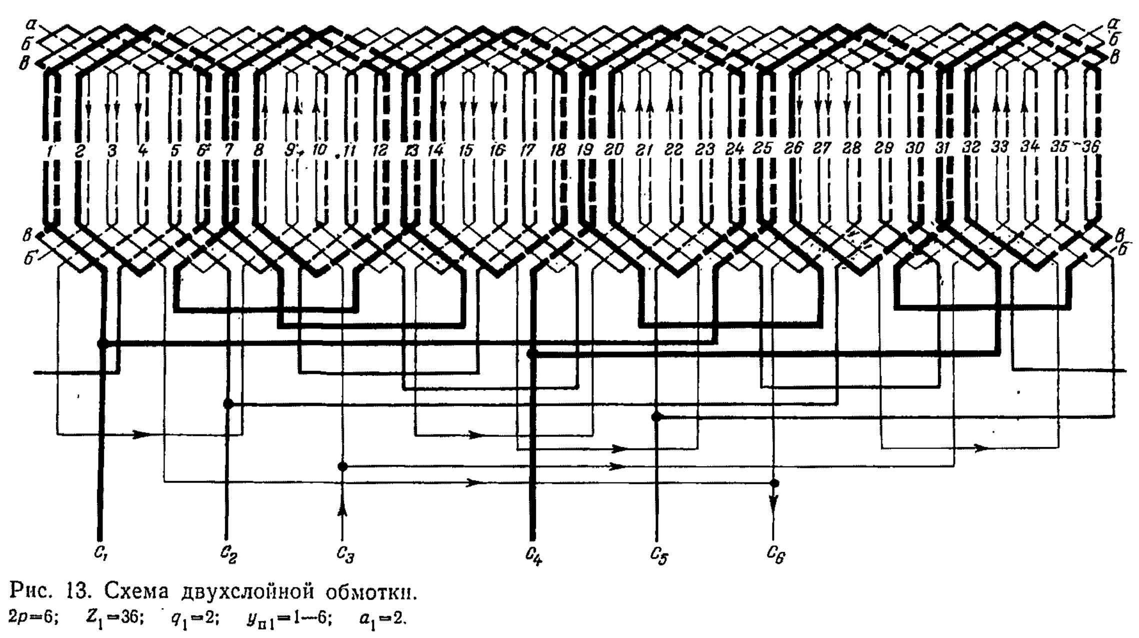


Рис. 13. Схема двухслойной обмотки.
$2p=6$; $Z_1=36$; $q_1=2$; $y_{п1}=1-6$; $a_1=2$.

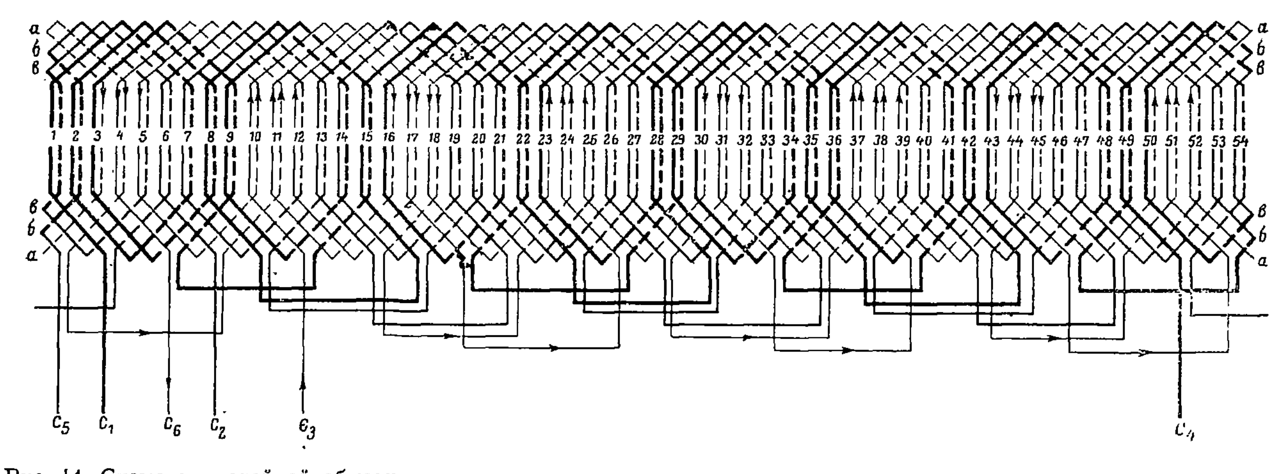


Рис. 14. Схема двухслойной обмотки.

$2p=8$; $Z_1=54$; $q_1=2\frac{1}{4}$; $y_{п1}=1-7$; $a_1=1$.

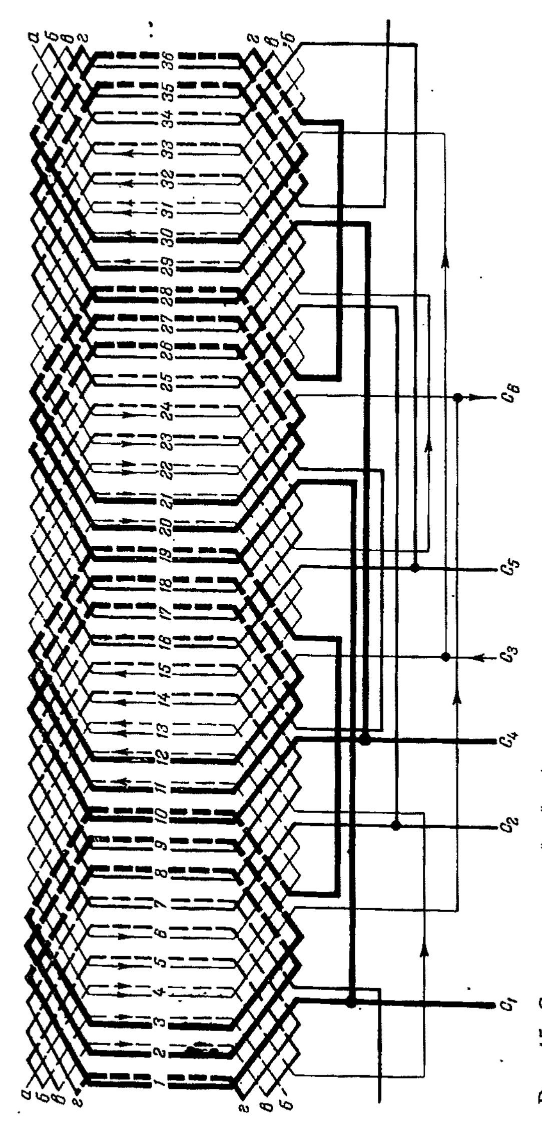


Рис. 15. Схема двухслойной обмотки.
$2p=4$; $Z_1=36$; $q_1=3$; $y_{п1}=1—8$; $a_1=2$.

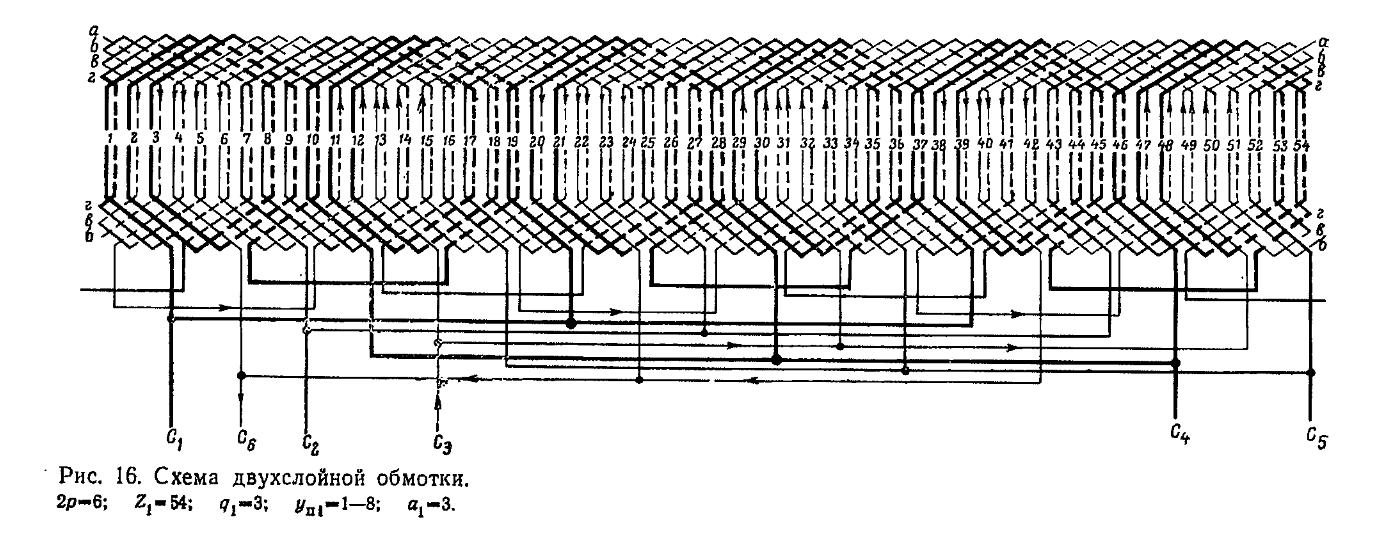


Рис. 16. Схема двухслойной обмотки.
$2p=6$; $Z_1=54$; $q_1=3$; $y_{п1}=1—8$; $a_1=3$.

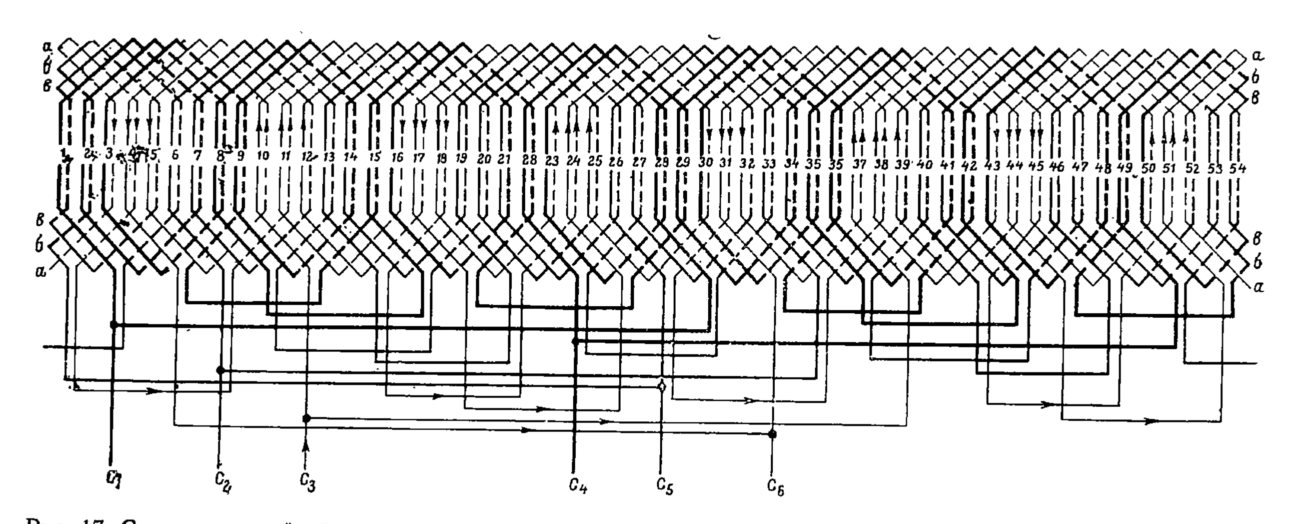


Рис. 17. Схема двухслойной обмотки.

$2p=8$; $Z_1=54$; $q_1=2^1/_4$; $y_{п1}=1-7$; $a_1=2$.

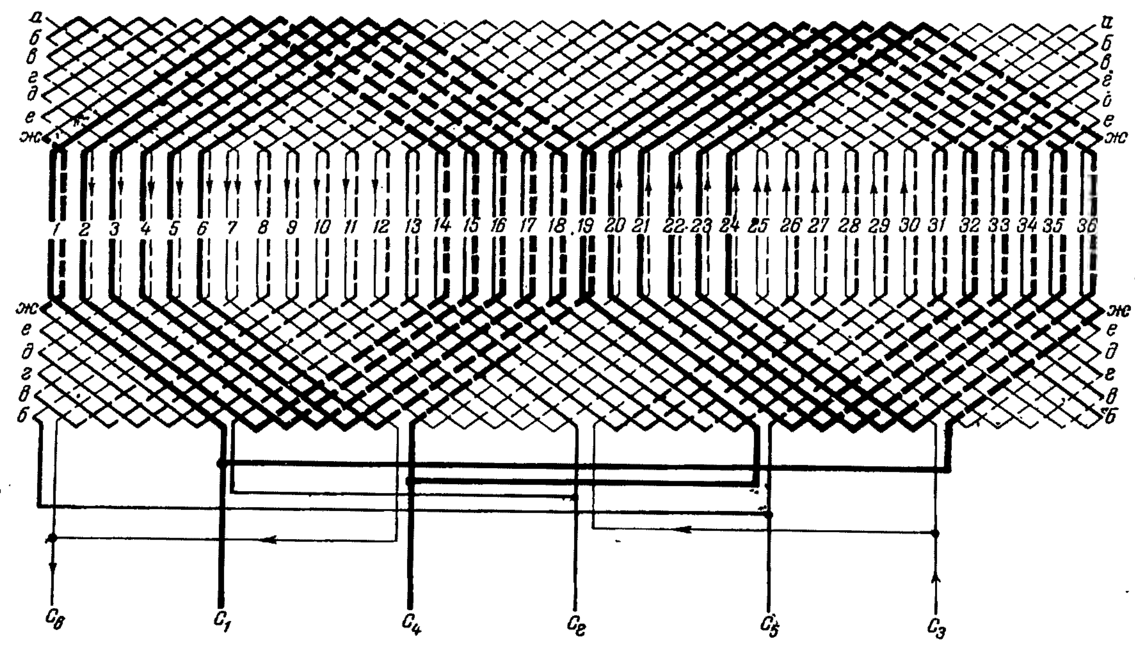


Рис. 18. Схема двухслойной обмотки.
$2p=2$; $Z_1=36$; $q_1=6$; $y_{п1}=1-14$; $a_1=2$.

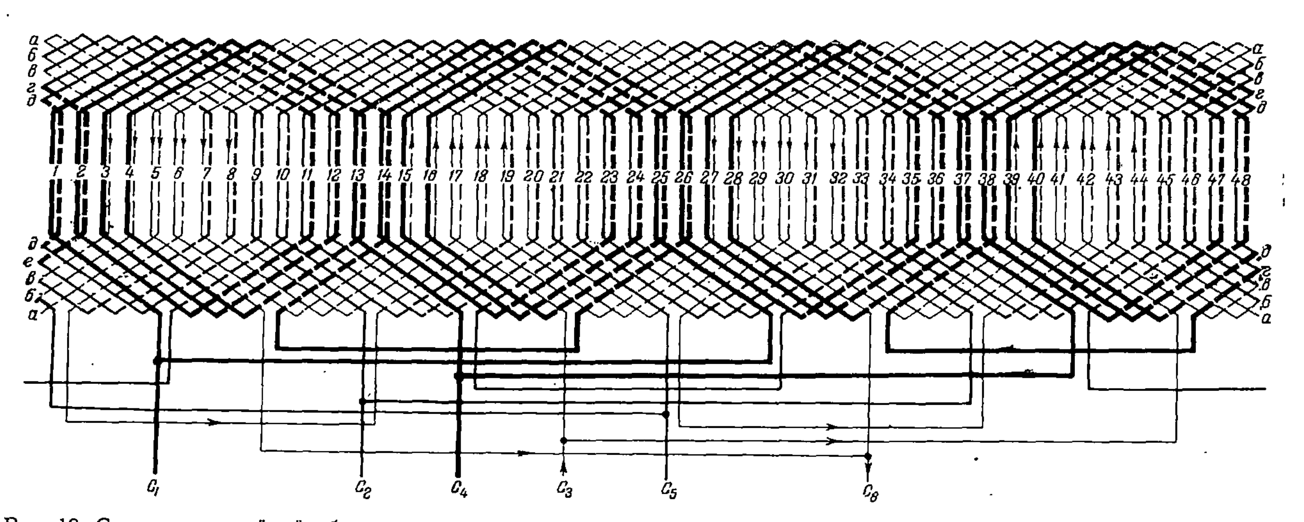


Рис. 19. Схема двухслойной обмотки.
$2p=4$; $Z_1=48$; $q_1=4$; $y_{п1}=1-11$; $a_1=2$.

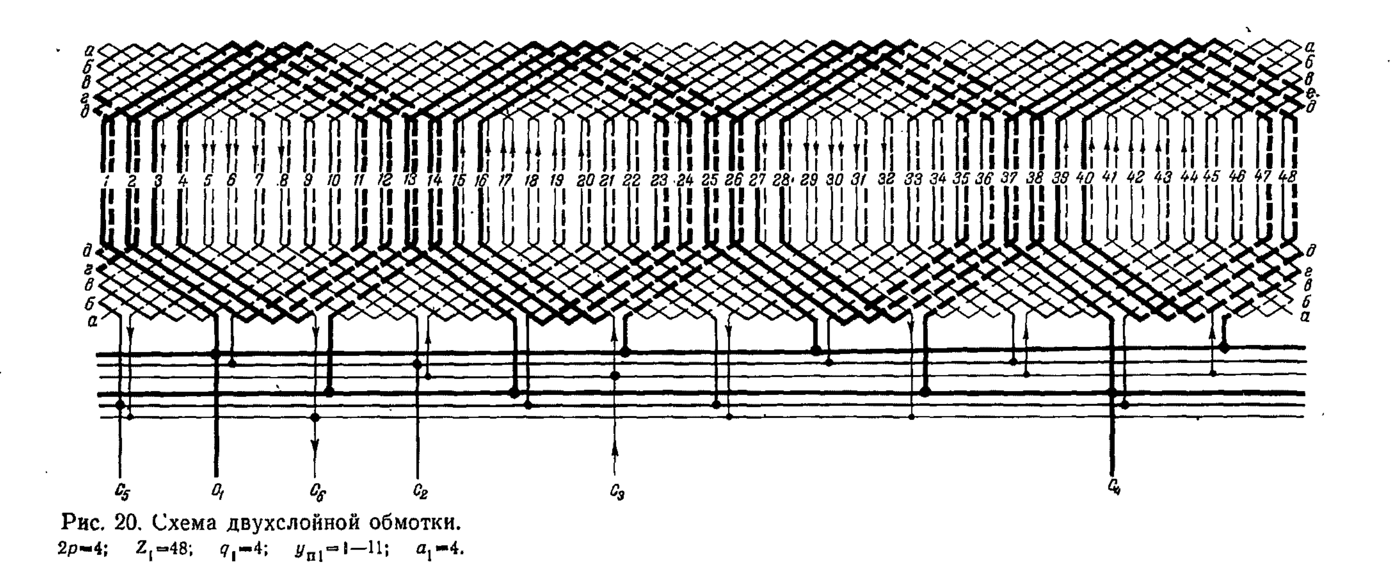


Рис. 20. Схема двухслойной обмотки.
$2p=4$; $Z_1=48$; $q_1=4$; $y_{п1}=1-11$; $a_1=4$.

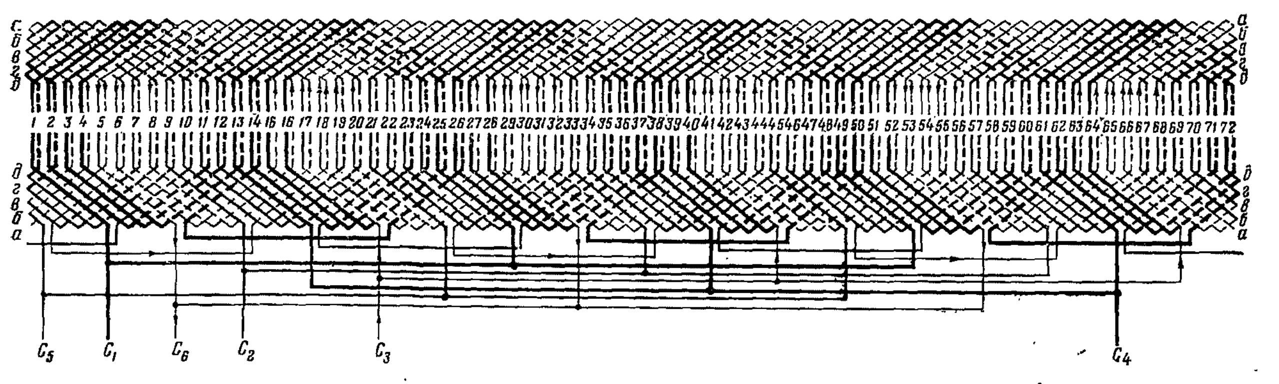


Рис. 21. Схема двухслойной обмотки.
$2p=6$; $Z_1=72$; $q_1=4$; $y_{п1}=1—11$; $a_1=3$.

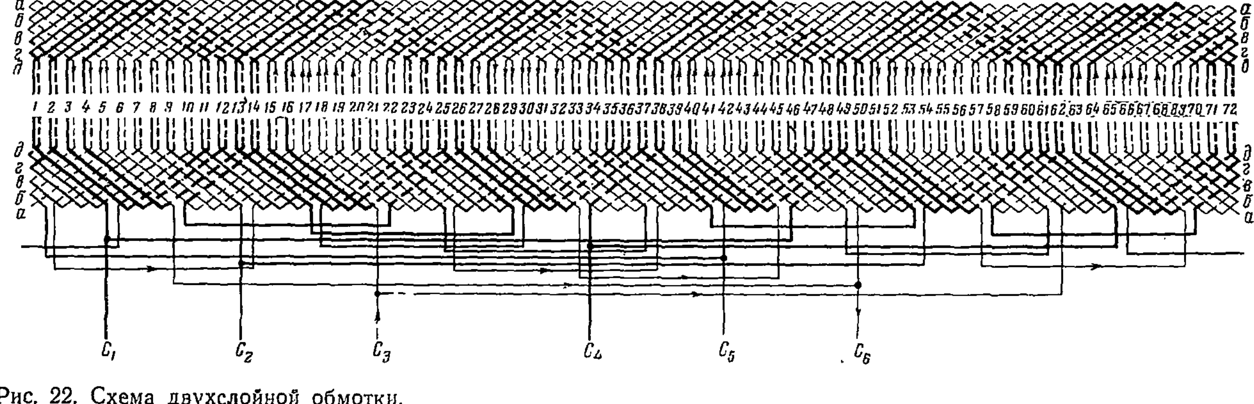


Рис. 22. Схема двухслойной обмотки.
$2p=6$; $Z_1=72$; $q_1=4$; $y_{п1}=1-11$; $\boldsymbol{a_1=2}$.

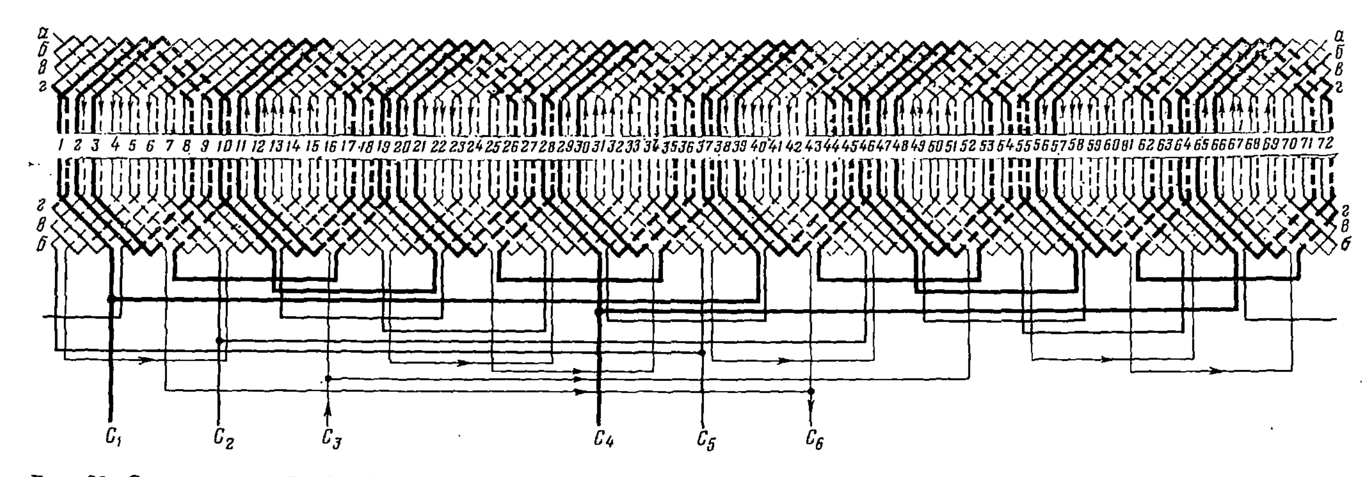


Рис. 23. Схема двухслойной обмотки.

$2p=8$; $Z_1=72$; $q_1=3$; $y_{п1}=1-8$; $a_1=2$.

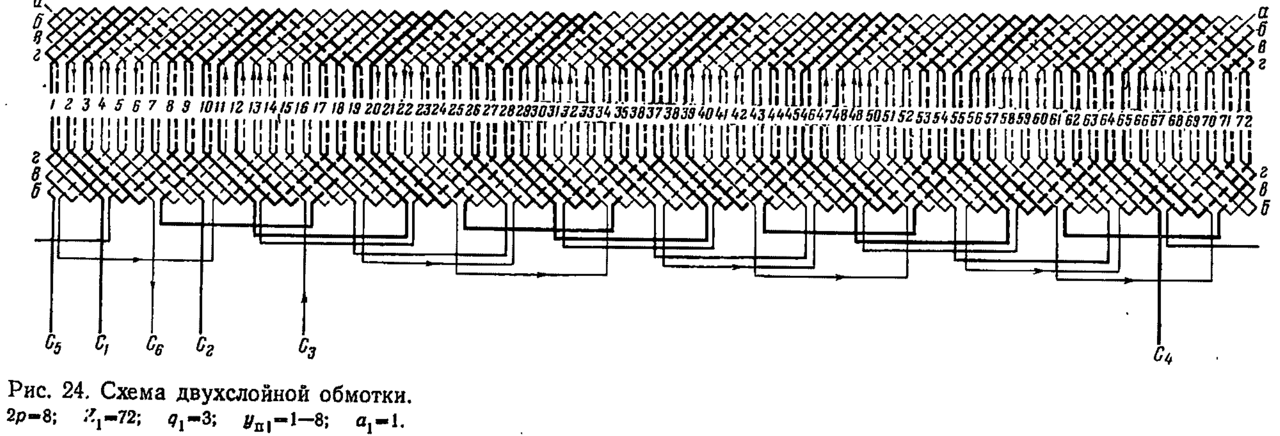


Рис. 24. Схема двухслойной обмотки.

$2p=8$; $Z_1=72$; $q_1=3$; $y_{п1}=1-8$; $a_1=1$.

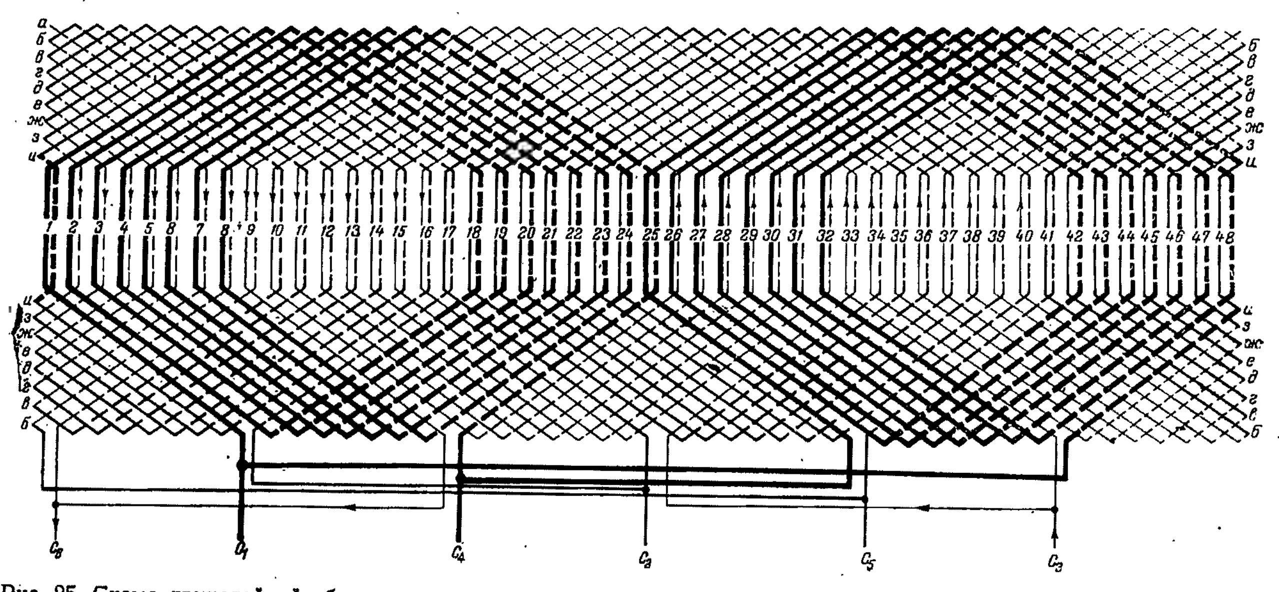


Рис. 25. Схема двухслойной обмотки.
$2p=2$; $Z_1=48$; $q_1=8$; $y_{\text{п}1}=1-18$; $a_1=2$.

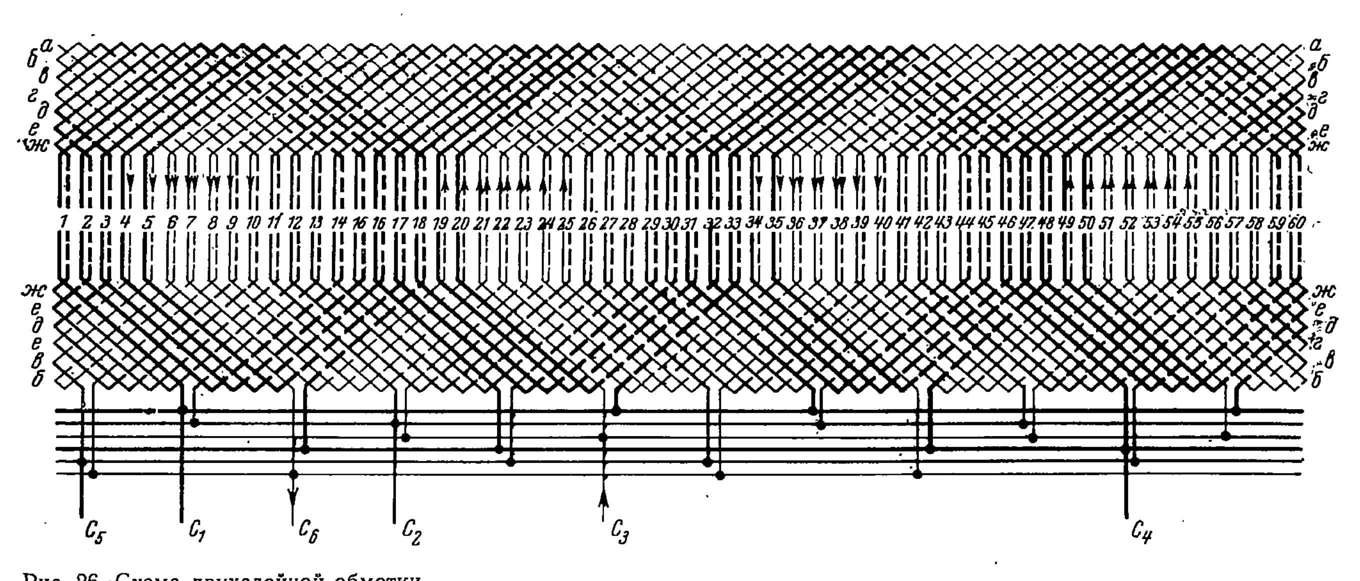


Рис. 26. Схема двухслойной обмотки.

$2p=4$; $Z_1=60$; $q_1=5$; $y_{п1}=1-14$; $a_1=4$.

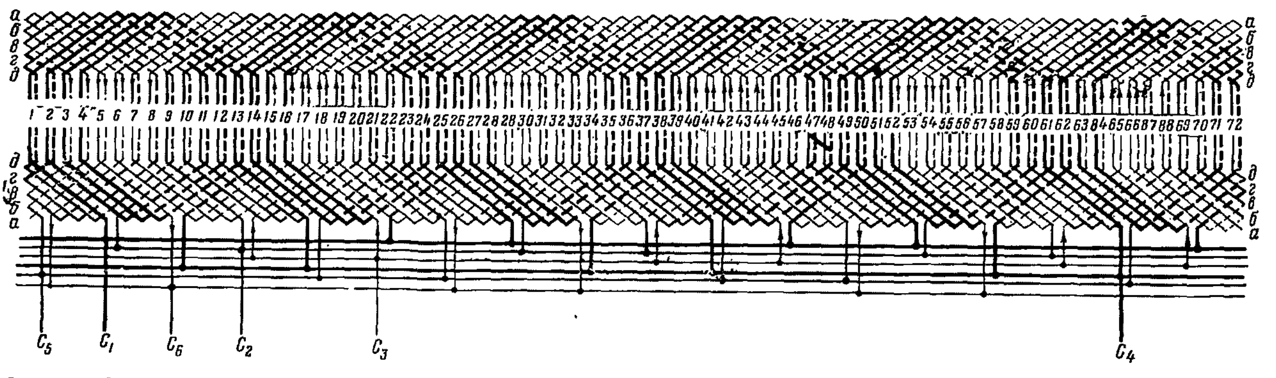


Рис. 27. Схема двухслойной обмотки.
$2p=6$; $Z_1=72$; $q_1=4$; $y_{п1}=1—11$; $a_1=6$.

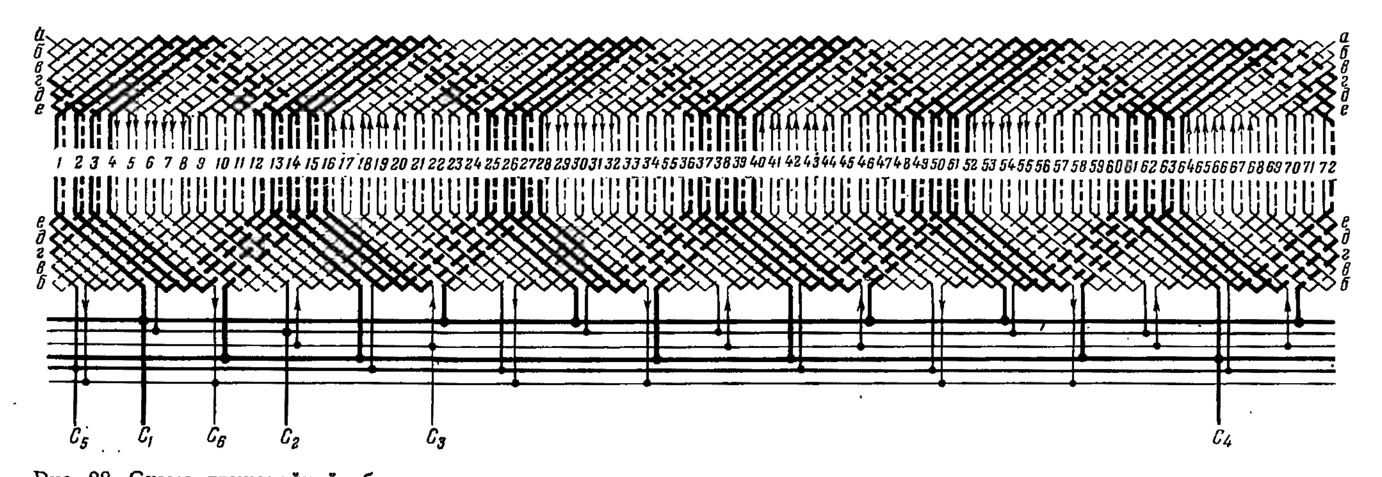


Рис. 28. Схема двухслойной обмотки.
$2p=6$; $Z_1=72$; $q_1=4$; $y_{п1}=1-12$; $a_1=6$.

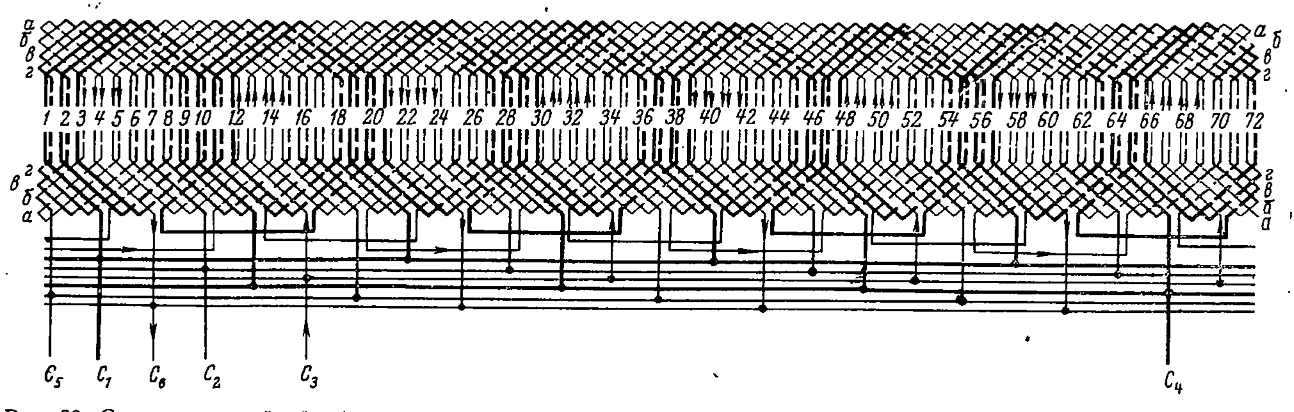


Рис. 29. Схема двухслойной обмотки.
$2p=8$; $Z_1=72$; $q_1=3$; $y_{п1}=1-9$; $a_1=4$.

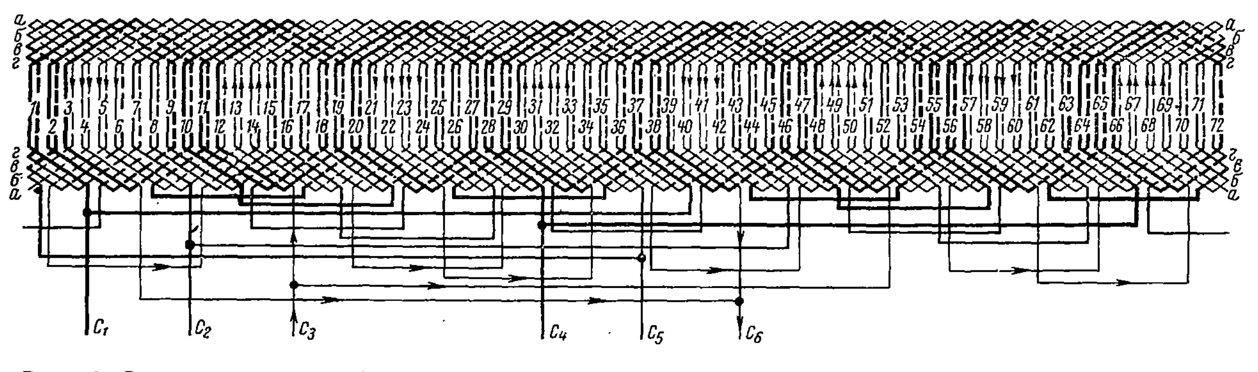


Рис. 30. Схема двухслойной обмотки.
$2p=8$; $Z_1=72$; $q_1=3$; $y_{п1}=1-9$; $a_1=2$.

В первом из этих уравнений допущено, что изменением к. п. д. электродвигателя при изменении тока статора можно пренебречь; во втором уравнении принято, что намагничивающие силы пропорциональны $I_{ф1} \sin \varphi$ и при сохранении величины индукции остаются постоянными.

В соответствии с изложенным следует, что, например, для электродвигателя, имеющего в заводском исполнении обмотку из медного провода ПЭЛБО ∅ 1,0/1,2 мм и $\cos\varphi=0{,}85$, после перемотки с переходом на алюминиевый провод ПЭВА-2 (ПЭЛРА-2) ∅ 1,16/1,24 мм и сохранением изоляции класса А потребуется согласно табл. 18 понижение допустимого тока статора в отношении

$$\frac{I_{ф1а}}{I_{ф1м}}=0{,}91$$

и соответственно

$$\frac{P_а}{P_м}=\sqrt{\frac{0{,}91^2+0{,}85^2-1}{0{,}85}}=0{,}87.$$

Таким образом, для рассмотренного случая снижение тока составит 9%, а понижение мощности 13%. При переходе на изоляцию класса Е электродвигатель сохранил бы номинальную мощность.

Проверка на соответствие ГОСТ

Действующие в настоящее время ГОСТ 186-52 (с изменением № 5) на электродвигатели серии А и АО и ГОСТ 13859-68 на электродвигатели серии А2 и АО2 не распространяются на асинхронные электродвигатели с алюминиевой обмоткой статора. Все же интересно сравнить электродвигатели, перематываемые с применением алюминиевых проводов согласно рекомендации настоящей работы, с требованиями ГОСТ, действовавшего ранее.

Согласно ГОСТ 186-52 (с изменением № 4, принятым в 1963 г.) для электродвигателей с алюминиевыми обмотками статора допускалось снижение к. п. д. по сравнению с электродвигателями с медными обмотками, как это указано в сравнительной табл. 23.

Руководствуясь табл. 23, определяем допустимый коэффициент увеличения всех потерь β электродвигателя и потерь только в обмотке статора y по табл. 24.

Таблица 23

Мощность электродвигателя, кВт	К. п. д. электродвигателя, %				Мощность электродвигателя, кВт	К. п. д. электродвигателя, %			
	1 500 об/мин		1 000 об/мин			1 500 об/мин		1 000 об/мин	
	с обмоткой статора					с обмоткой статора			
	медной	алюминиевой	медной	алюминиевой		медной	алюминиевой	медной	алюминиевой
1,0	78,5	—	77,0	73,5	20,0	89,0	87,5	88,0	86,5
1,7	81,5	79,0	79,5	76,5	28,0	90,0	88,5	89,0	87,5
2,8	83,5	81,0	82,5	80,0	40,0	90,5	89,0	90,0	88,5
4,5	85,5	83,5	84,5	82,0	55,0	91,0	90,0	91,0	89,5
7,0	87,0	85,0	86,0	83,5	75,0	91,5	90,5	92,0	90,5
10,0	87,5	86,0	86,5	84,5	100,0	92,0	91,0	—	—
14,0	88,5	87,0	87,0	85,0					

В табл. 24 допустимый коэффициент увеличения потерь в обмотке определен следующим образом:

пусть β — допустимый коэффициент увеличения всех потерь при переходе на алюминиевую обмотку согласно ГОСТ 186-52; γ — удельный вес джоулевых потерь в обмотке статора по отношению ко всем потерям электродвигателя в долях единицы; $1-\gamma$ — доля остальных потерь, остающихся неизменными.

Тогда искомый допустимый коэффициент y (в долях единицы) увеличения джоулевых потерь в обмотке определим из уравнения $y\gamma + (1-\gamma) = \beta$, откуда

$$y = \frac{\beta - 1}{\gamma} + 1.$$

Так как γ никогда не бывает больше, чем 0,5, т. е. $\gamma \leqslant 0{,}5$, то $y \geqslant 2\beta - 1$.

Таблица 24

Мощность электродвигателя, кВт	Электродвигатель на 1 500 об/мин		Электродвигатель на 1 000 об/мин		Мощность электродвигателя, кВт	Электродвигатель на 1 500 об/мин		Электродвигатель на 1 000 об/мин	
	β	y	β	y		β	y	β	y
1,0	—	—	1,15	1,30	20,0	1,135	1,27	1,12	1,24
1,7	1,14	1,28	1,15	1,30	28,0	1,15	1,30	1,135	1,27
2,8	1,15	1,30	1,14	1,28	40,0	1,16	1,32	1,15	1,30
4,5	1,135	1,27	1,16	1,32	55,0	1,11	1,22	1,165	1,33
7,0	1,15	1,30	1,18	1,36	75	1,12	1,24	1,19	1,38
10,0	1,12	1,24	1,15	1,30	100,0	1,12	1,24	—	—
14,0	1,13	1,26	1,15	1,30					

Нагрев электродвигателя с алюминиевой обмоткой при пуске

Под влиянием пускового тока, который обычно в несколько раз больше номинального тока, обмотка статора электродвигателя интенсивно нагревается, что обычно характеризуется величиной $d\tau$, °С/с — скоростью возрастания температуры обмотки статора в период пуска; высокие значения $d\tau$ приводят к ускоренному износу изоляции.

Обычно у низковольтных асинхронных электродвигателей $d\tau$ лежит в пределах 3—6 °С/с; рассмотрим, как изменится эта величина при замене меди алюминием.

Можно считать, что за время пуска обмотка статора не успевает отдать тепло охлаждающему воздуху и нагрев обмотки ограничивается ее теплоемкостью согласно уравнению

$$d\tau = I^2_{\text{пер}} \frac{R}{C} = I^2_{\text{пер}} \frac{\rho}{C_w q^2},$$

где $I_{\text{пер}}$ — среднее (эффективное) значение тока статора за период пуска; C — теплоемкость обмотки; C_w — удельная теплоемкость обмотки на единицу объема; q — сечение проводниковой жилы.

Если переход на алюминий осуществляется с сохранением прежнего числа эффективных проводов в пазу, то величина среднего пускового тока $I_{\text{пер}}$ не изменится; в этом случае отношение $d\tau_{\text{а}}$ и $d\tau_{\text{м}}$ для данного электродвигателя выразится зависимостью

$$\frac{d\tau_{\text{а}}}{d\tau_{\text{м}}} = \frac{\rho_{\text{а}}}{\rho_{\text{м}}} \frac{C_{w\text{м}}}{C_{w\text{а}}} \left(\frac{q_{\text{м}}}{q_{\text{а}}}\right)^2.$$

Подставляя указанные в табл. 6 соотношения $\rho_{\text{а}}/\rho_{\text{м}}$ и $C_{w\text{а}}/C_{w\text{м}}$, найдем:

$$\frac{d\tau_{\text{а}}}{d\tau_{\text{м}}} = 1{,}63 \frac{1}{0{,}675} \left(\frac{q_{\text{м}}}{q_{\text{а}}}\right)^2 = 2{,}4 \left(\frac{q_{\text{м}}}{q_{\text{а}}}\right)^2.$$

Из этого уравнения видно, что для того, чтобы скорость возрастания температуры во время пуска не увеличилась, необходимо, чтобы

$$\frac{q_{\text{а}}}{q_{\text{м}}} \geqslant \sqrt{2{,}4} \geqslant 1{,}57 \cdot$$

Из табл. 18 и 19 видно, что условие соблюдается очень редко, поэтому при переходе на алюминий величина $d\tau$ обычно возрастает. Во избежание ускоренного износа изоляции при пусках переход на более высокий

класс изоляции Е при замене меди алюминием оказывается необходимым.

С этой точки зрения для электродвигателей с тяжелыми условиями пуска вообще нельзя рекомендовать переход на алюминиевую обмотку статора.

Выводы

1. При сохранении неизменным числа эффективных проводов в пазу, для того чтобы сохранить мощность электродвигателя при замене медных проводов алюминиевыми, необходимо увеличить диаметр алюминиевого провода на 28% по сравнению с медным.

2. Если есть возможность повысить класс нагревостойкости изоляции (класс Е вместо класса А), достаточно увеличить диаметр алюминиевого провода на 11% по сравнению с медным.

3. За счет более тонкой изоляции алюминиевых проводов можно при замене проводов марки ПЭЛБО повысить диаметр алюминиевого провода в среднем на 10—15% по сравнению с медным, а при замене проводов марки ПБД — в среднем на 10—20%.

4. За счет увеличения коэффициента заполнения свободного сечения паза диаметр алюминиевого провода можно увеличить еще на 5%.

5. За счет уменьшения числа m_1 (числа элементарных проводников в эффективном проводе) можно в некоторых случаях повысить сечение эффективного алюминиевого провода на несколько процентов.

6. Если нет возможности повысить класс нагревостойкости изоляции и использовать выгоду от более тонкой изоляции провода (например, когда в заводском исполнении уже использованы изоляция класса Е и провода с тонкой эмалевой изоляцией), снижение мощности электродвигателя при замене медных проводов алюминиевыми является неизбежным.

7. Для электродвигателей с тяжелыми условиями пуска замена медных проводов алюминиевыми нецелесообразна.

1-4. РАСЧЕТ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ ПАЗА (ОБЩИЙ СЛУЧАЙ)

При ремонте обмоток может представиться возможность повысить мощность электродвигателя за счет увеличения по сравнению с заводским исполнением общего коэффициента заполнения паза $k_з$ в результате:

применения обмоточного провода с более тонкой изоляцией;

применения более тонких материалов для пазовой изоляции;

уменьшения толщины межсекционной прокладки в пазу или ликвидации ее путем перехода с двухслойной на однослойную обмотку;

увеличения (в допустимых пределах) индукции в зазоре путем соответствующего уменьшения числа эффективных проводов в пазу и увеличения их диаметра;

уменьшения числа элементарных проводников в эффективном проводе и числа параллельных ветвей в фазе с целью применения проводников максимально возможного диаметра.

Рассмотрим, в каких практически возможных пределах может быть увеличена $k_з$ и в какой степени ее увеличение может быть использовано для повышения номинальной мощности электродвигателя без ухудшения его эксплуатационных качеств.

Как указывалось в формуле (14), общий коэффициент заполнения паза может быть представлен в виде произведения трех частных коэффициентов

$$k_з = k_{з.п} k_{с.с} k_{з.с}.$$

Если обозначить индексами 1 и 2 данные, относящиеся к старому и новому исполнению, то отношение общих коэффициентов заполнения паза выразится так:

$$\frac{k_{з2}}{k_{з1}} = \frac{k_{з.п2}}{k_{з.п1}} \cdot \frac{k_{с.с2}}{k_{с.с1}} \cdot \frac{k_{з.с2}}{k_{з.с1}}.$$

Для круглых проводов марок ПЭВ-2 и ПЭВА-2, применяемых в настоящее время для изготовления обмоток, коэффициент заполнения провода $k_{з.п}$ приведен в табл. 10. Как видно из таблицы, этот коэффициент изменяется в небольших пределах: от 0,65 — для проводов малого диаметра до 0,73 — для проводов большого диаметра. Относительно высокая величина $k_{з.п}$ определяется относительно тонкой изоляцией провода.

Обмотки электродвигателей старых выпусков выполнялись проводом марки ПБД или ПЭЛБО, у которых двусторонняя толщина изоляции Δ больше и соответствующие коэффициенты заполнения провода $k_{з.п}$ значительно меньшие, чем у проводов ПЭВ-2 и ПЭВА-2, приведены в табл. 25.

Отношение $k_{з.п2}/k_{з.п1}$ при замене проводов марок ПБД или ПЭЛБО проводом ПЭВ-2 или ПЭВА-2 большего сечения, но с тем же диаметром изолированного провода указано в табл. 26.

Величина коэффициента свободного сечения паза $k_{с.с}$, как указывалось, зависит от толщины пазовой изоляции, прокладок и клина. При пазовой изоляции (пазовой коробочке), применяемой в электродвигателях старых выпусков, состоящей из двух слоев электрокартона и одного слоя лакоткани общей толщиной 0,6 мм, $k_{с.с1}$ (в зависимости от соотношения между высотой и шириной паза) составлял 0,7—0,73. Для электродвигателей, изготовляемых и ремонтируемых в настоящее время, в которых пазовая изоляция выполняется из одного слоя пленкоэлектрокартона толщиной 0,27 мм, $k_{с.с2}$ достигает 0,77—0,8.

Таким образом, если при ремонте не изменялась изоляция паза, то

$$\frac{k_{с.с2}}{k_{с.с1}} = 1 .$$

Таблица 25

Диаметр неизолированного провода d, мм	Провод марки ПБД Δ, мм	ПБД $k_{з.п}$	ПЭЛБО Δ, мм	ПЭЛБО $k_{з.п}$	Диаметр неизолированного провода d, мм	Провод марки ПБД Δ, мм	ПБД $k_{з.п}$	ПЭЛБО Δ, мм	ПЭЛБО $k_{з.п}$
0,51	0,22	0,38	0,17	0,44	1,35	0,27	0,53	0,21	0,59
0,59	0,22	0,42	0,17	0,47	1,5	0,27	0,56	0,21	0,60
0,69	0,22	0,46	0,17	0,51	1,81	0,27	0,61	0,21	0,64
0,80	0,22	0,48	0,18	0,53	2,02	0,27	0,61	0,21	0,64
0,9	0,22	0,50	0,18	0,54	2,26	0,33	0,62	—	—
1,0	0,27	0,50	0,21	0,54	2,44	0,33	0,63	—	—
1,2	0,27	0,52	0,21	0,57					

Примечание. Значение $k_{з.п}$ для промежуточных значений d находится интерполяцией или вычислением по формуле $k_{з.п}=\frac{\pi d_1^2}{4d_{из}^2}$; $d_{из}$ — диаметр изолированного провода указан в каталогах обмоточных проводов.

Если же трехслойная изоляция заменена на однослойную из пленкоэлектрокартона, то

$$\frac{k_{с.с2}}{k_{с.с1}}=\frac{0,77\div0,8}{0,7\div0,73}\approx1,1.$$

Коэффициент заполнения свободного сечения паза $k_{з.с}$ зависит от того, как плотно удается заполнить паз проводом. Практически на величину $k_{з.с}$ не влияет размер и марка обмоточного провода; имеет

Таблица 26

Диаметр неизолированного провода d, мм	Для обмотки из провода ПЭВ-2 или ПЭВА-2, взамен обмотки, выполненной из провода ПБД	ПЭЛБО	Диаметр неизолированного провода d, мм	Для обмотки из провода ПЭВ-2 или ПЭВА-2, взамен обмотки, выполненной из провода ПБД	ПЭЛБО
0,51	1,65	1,43	1,35	1,28	1,15
0,59	1,51	1,35	1,5	1,23	1,14
0,69	1,38	1,24	1,81	1,15	1,11
0,80	1,34	1,21	2,02	1,15	1,11
0,9	1,28	1,19	2,26	1,13	—
1,0	1,35	1,22	2,44	1,12	—
1,2	1,28	1,17			

Примечание. Отношение $k_{з.п2}/k_{з.п1}$ для промежуточных значений d находится интерполяцией.

значение только материал провода. Для медных проводов $k_{з.с}$ составляет 0,68—0,70, а для алюминиевых, менее жестких, чем медные — 0,72—0,75.

Таким образом, если при ремонте не изменялся материал провода, то

$$\frac{k_{з.с2}}{k_{з.с1}} = 1;$$

если медные провода заменены алюминиевыми, то

$$\frac{k_{з.с2}}{k_{з.с1}} = \frac{0,72 \div 0,75}{0,68 \div 0,7} \approx 1,05;$$

если алюминиевые провода заменены медными, то

$$\frac{k_{з.с2}}{k_{з.с1}} = \frac{0,68 \div 0,7}{0,72 \div 0,75} \approx 0,95.$$

В качестве практического примера определим отношение общих коэффициентов заполнения паза в заводском исполнении и при ремонте с заменой провода ПБД диаметром 1,04 мм проводом ПЭВ-2 и одновременной заменой трехслойной изоляции на более тонкую однослойную.

Из табл. 26 видно, что в данном случае без увеличения диаметра изолированного провода можно использовать провод ПЭВ-2 диаметром 1,2 мм:

$k_{з.п2}/k_{з.п1} = 1,28$ — из табл. 26;

$k_{с.с2}/k_{с.с1} = 1,1$ — в результате замены трехслойной изоляции на более тонкую — однослойную;

$k_{з.с2}/k_{з.с1} = 1$ — так как при ремонте материал обмоточного провода не изменен;

$$b = \frac{k_{з2}}{k_{з1}} = \frac{k_{з.п2}}{k_{з.п1}} \frac{k_{с.с2}}{k_{с.с1}} \frac{k_{з.с2}}{k_{з.с1}} = 1,28 \cdot 1,1 \cdot 1 = 1,41.$$

Рассмотрим, насколько может быть увеличена мощность электродвигателя при повышении общего коэффициента заполнения паза в отношении

$$b = k_{з2}/k_{з1}.$$

При рассмотрении вопроса поставим требования:

1. При увеличении мощности электродвигателя должна быть сохранена кратность максимального вращающего момента — отношение максимального вращающего момента $M_м$ к номинальному $M_н$, если же у ремонтируемой машины это отношение $M_м/M_н$ в заводском исполнении было выше величины, требуемой ГОСТ, оно не должно опуститься ниже этой величины.

2. Сумма потерь в активной стали и обмотке статора должна остаться на прежнем уровне.

Если обозначить искомый коэффициент увеличения мощности $\gamma = P_{ном2}/P_{ном1}$, то с некоторым приближением можно считать, что номинальные токи в старом и новом исполнении пропорциональны номинальным мощностям, т. е.

$$\frac{I_{ном2}}{I_{ном1}} = \frac{P_{ном2}}{P_{ном1}} = \gamma.$$

Так как максимальный вращающий момент приблизительно пропорционален квадрату индукции, то индукцию в зазоре следует увеличить (если это не приведет к недопустимому увеличению индукций в зубце и спинке) в отношении

$$\frac{B_{\delta 2}}{B_{\delta 1}}=\sqrt{\gamma},$$

для чего (при сохранении старой схемы обмотки) число эффективных проводов в пазу следует уменьшить в том же соотношении

$$\frac{w_{\text{эф.п}2}}{w_{\text{эф.п}1}}=\frac{1}{\sqrt{\gamma}}.$$

Сечение эффективного провода увеличивается за счет двух факторов; уменьшения числа эффективных проводов в пазу и увеличения коэффициента заполнения паза, поэтому

$$\frac{Q_{\text{эф}2}}{Q_{\text{эф}1}}=b\sqrt{\gamma}.$$

Рассмотрим, как в результате такой переделки изменяются потери в стали и в обмотке статора.

Потери в стали приблизительно пропорциональны квадрату индукции в зазоре, поэтому

$$\frac{p_{\text{ст}2}}{p_{\text{ст}1}}=\left(\frac{B_{\delta 2}}{B_{\delta 1}}\right)^2=\gamma.$$

Для определения потерь в обмотке $p_{\text{об}}$ найдем, как изменится ее сопротивление R постоянному току:

$$\frac{R_2}{R_1}=\frac{w_{\text{эф.п}2}}{w_{\text{эф.п}1}}\,\frac{Q_{\text{эф}1}}{Q_{\text{эф}2}}=\frac{1}{\sqrt{\gamma}}\,\frac{1}{b\sqrt{\gamma}}=\frac{1}{b\gamma},$$

поэтому

$$\frac{p_{\text{об}2}}{p_{\text{об}1}}=\frac{I^2_{\text{ном}2}R_2}{I^2_{\text{ном}1}R_1}=\frac{\gamma^2}{b\gamma}=\frac{\gamma}{b}.$$

По поставленному условию неизменности суммы потерь в активной стали и в обмотке статора

$$p_{\text{ст}2}+p_{\text{об}2}=p_{\text{ст}1}+p_{\text{об}1}.$$

Обозначим $p_{\text{ст}1}/p_{\text{об}1}=\sigma$ и в предыдущее уравнение подставим:

$$p_{\text{ст}2}=p_{\text{ст}1}\gamma=p_{\text{об}1}\gamma\sigma;$$

$$p_{\text{об}2}=p_{\text{об}1}\frac{\gamma}{b}.$$

Тогда

$$\gamma\sigma+\frac{\gamma}{b}=\sigma+1,$$

откуда

$$\gamma = \frac{b(\sigma+1)}{b\sigma+1}$$

или

$$\gamma - 1 = (b-1)\frac{1}{b\sigma+1}.$$

Таким образом, в результате поставленного требования постоянства суммы потерь в активной стали и обмотке оказалось, что на зависимость между величинами γ и b влияет величина σ, т. е. отношение потерь в стали и обмотке электродвигателя.

Это отношение для различных машин колеблется в довольно узких пределах. Если задаться некоторой средней величиной $\sigma = 0{,}45 \div 0{,}55$ и учесть, что величина b может изменяться в пределах 1,1—1,5, то

$$\gamma - 1 \approx 0{,}7(b-1),$$

т. е. каждому проценту увеличения общего коэффициента заполнения паза соответствует около 0,7% увеличения мощности.

Предыдущее выражение можно представить в виде

$$\gamma = 0{,}7b + 0{,}3.$$

Тогда соотношение номинальных мощностей и токов

$$\gamma = \frac{P_{ном2}}{P_{ном1}} = \frac{I_{ном2}}{I_{ном1}} = 0{,}7b + 0{,}3;$$

соотношение числа активных проводов в пазу

$$\frac{w_{эф.п2}}{w_{эф.п1}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}7b+0{,}3}};$$

соотношение сечений эффективных проводов

$$\frac{Q_{эф2}}{Q_{эф1}} = b\sqrt{0{,}7b+0{,}3};$$

соотношение плотностей тока

$$\frac{j_2}{j_1} = \frac{\sqrt{0{,}7b+0{,}3}}{b};$$

соотношение линейных нагрузок

$$\frac{A_2}{A_1} = \sqrt{0{,}7b+0{,}3};$$

соотношение индукций в зазоре

$$\frac{B_{\delta 2}}{B_{\delta 1}} = \sqrt{0{,}7b+0{,}3};$$

соотношение факторов нагрева

$$\frac{j_2A_2}{j_1A_1}=\frac{0,7b+0,3}{b}<1.$$

Эти соотношения для значений b от 1,1 до 1,5 представлены в табл. 27.

При пересчете электродвигателя по приведенным формулам его мощность увеличивается, а потери остаются постоянными, поэтому к. п. д. электродвигателя повышается. Величина намагничивающего тока под влиянием насыщения активной стали может вырасти несколько больше, чем величина номинальной мощности, поэтому $\cos\varphi$ может несколько уменьшиться.

Если при пересчете индукции в отношении $\sqrt{0,7b+0,3}\ B_{\delta 2}$ превзойдет предельно допустимую величину по табл. 11, то следует ограничить ее значение до $B'_{\delta 2}$ согласно (табл. 11) и расчет вести исходя из коэффициента увеличения мощности

$$\gamma=\left(\frac{B'_{\delta 2}}{B_{\delta 1}}\right)^2.$$

Тогда окончательно

$$P_{\text{ном}2}=P_{\text{ном}1}\gamma';$$

$$I_{\text{ном}2}=I_{\text{ном}1}\gamma';$$

$$w_{\text{эф.п}2}=w_{\text{эф.п}1}b\sqrt{\gamma'}.$$

В этом случае, так как $\gamma'<\gamma$, суммарные потери электродвигателя снизятся.

Все приведенные выше формулы справедливы также, когда общий коэффициент заполнения паза уменьшается, что в практике может иметь место при отсутствии проводов и изоляционных материалов требуемых размеров. При этом, так как величина b окажется меньше единицы, номинальная мощность электродвигателя уменьшается.

В качестве примера изменения мощности электродвигателя при изменении коэффициента заполнения паза можно привести результаты перемотки электродвигателя единой серии типа А63-4 мощностью 14 кВт, напряжением 220/380 В, при которой мощность электродвигателя была увеличена до 17 кВт *.

Параметры электродвигателя в заводском исполнении

Число элементарных проводников в пазу	$n_1=64$
Число параллельных ветвей в фазе	$a_1=2$
Число элементарных проводников в эффективном проводе	$m_1=2$
Диаметр проводника без изоляции	$d_1=1,30$ мм
Марка изоляции провода	ПЭЛБО
Двусторонняя толщина изоляции	$2\Delta=0,21$ мм
Диаметр изолированного провода	$d_{\text{из}1}=1,51$ мм
Толщина пазовой изоляции	0,6 мм
Коэффициент заполнения паза	$k_{з1}=0,29$

* Кузнецов Б. Н. Влияние толщины изоляции на размеры электрических машин. В кн.: Изоляция электрических машин. М., ЦБТИ МЭП, стр. 22.

Таблица 27

Соотношение	Расчетная формула	Величина соотношения при b, равном								
		1,1	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,5
$\frac{P_{ном2}}{P_{ном1}}, \frac{I_{ном2}}{I_{ном1}}$	$0,7b+3$	1,07	1,105	1,14	1,175	1,21	1,245	1,28	1,315	1,35
$\frac{w_{эф.п2}}{w_{эф.п1}}$	$\frac{1}{\sqrt{0,7b+0,3}}$	0,97	0,955	0,94	0,925	0,91	0,90	0,88	0,87	0,86
$\frac{Q_{эф2}}{Q_{эф1}}$	$b\sqrt{0,7b+0,3}$	1,14	1,21	1,28	1,36	1,43	1,50	1,58	1,66	1,74
$\frac{j_2}{j_1}$	$\frac{\sqrt{0,7b+0,3}}{b}$	0,94	0,915	0,890	0,875	0,850	0,825	0,805	0,790	0,775
$\frac{A_2}{A_1}, \frac{B_{\delta_2}}{B_{\delta_1}}$	$\sqrt{0,7b+0,3}$	1,035	1,05	1,07	1,085	1,10	1,115	1,13	1,145	1,16
$\frac{j_2A_2}{j_1A_1}$	$\frac{0,7b+0,3}{b}$	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,922	0,915	0,905	0,90

При ремонте оставлены без изменения схема обмотки, число элементарных проводников в эффективном проводе и число параллельных ветвей в фазе.

Были изменены:

а) количество элементарных проводников в пазу; вместо 64 было уложено 60. Это уменьшение вполне целесообразно, так как величина индукции в стали в заводском исполнении не была предельной и ее увеличение на 7% вполне допустимо;

б) толщина пазовой изоляции; вместо изоляции толщиной 0,6 мм на сторону установлена изоляция толщиной 0,3 мм — за счет применения современных более тонких изоляционных материалов с повышенной электрической прочностью;

в) марка и размер провода; взамен провода марки ПЭЛБО, имеющего двустороннюю толщину изоляции 0,21 мм, был применен провод марки ПЭВ-2 с двусторонней толщиной изоляции 0,11 мм. Диаметр неизолированного провода увеличен до 1,45 мм и соответственно этому диаметр изолированного провода составил 1,56 мм.

С учетом уменьшения количества проводников, укладываемых в паз, и утоньшения пазовой изоляции незначительное увеличение диаметра изолированного провода вполне допустимо.

Коэффициент заполнения паза повысился до 0,38 и его отношение к коэффициенту заполнения паза в заводском исполнении составило:

$$b=\frac{0,38}{0,29}=1,31.$$

При указанном соотношении этих коэффициентов по данным табл. 27 увеличение номинальной мощности составляет 22%, т. е. мощность электродвигателя после модернизации будет равна 17 кВт.

1-5. РАСЧЕТ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Ремонт электродвигателей мощностью до 100 кВт и напряжением до 660 В, при котором изменяется его номинальное напряжение, как правило, удается выполнить без снижения мощности. В отличие от этого перевод крупных электродвигателей с номинального напряжения 3 на 6 кВ обычно связан со снижением мощности на 15—20% из-за необходимости увеличить толщину изоляции и вызванного этим снижения коэффициента свободного сечения паза $k_{с.с}$. Наряду с этим имеются примеры, когда перевод крупных электродвигателей на пониженное напряжение позволил увеличить их мощность благодаря облегчению пазовой изоляции.

Условием неизменности мощности является сохранение индукции на всех участках магнитной цепи и объема тока в пазу.

Из условия сохранения индукции согласно формуле (1) следует:

$$w_{эф.п12}=w_{эф.п11}\frac{U_{ф12}}{U_{ф11}}\frac{a_{12}}{a_{11}}\frac{k_{об11}}{k_{об12}},$$

а при сохранении также типа и шага обмотки

$$w_{\text{эф.п}12} = w_{\text{эф.п}11} \frac{U_{\text{ф}12}}{U_{\text{ф}11}}.$$

Здесь и далее к обозначениям, относящимся к старому заводскому исполнению, добавлен индекс 1, к исполнению при ремонте с изменением напряжения — индекс 2.

Из условия сохранения мощности согласно формуле (8) или (9) следует:

$$\frac{I_{\text{ф}12}}{I_{\text{ф}11}} = \frac{U_{\text{ф}11}}{U_{\text{ф}12}}.$$

Если оставить неизменными плотность тока в обмотке, то согласно формуле (11)

$$\frac{Q_{\text{эф.п}12}}{Q_{\text{эф.п}11}} = \frac{I_{\text{ф}12}}{I_{\text{ф}11}} = \frac{U_{\text{ф}11}}{U_{\text{ф}12}}$$

или

$$Q_{\text{эф.п}12} = Q_{\text{эф.п}11} \frac{U_{\text{ф}11}}{U_{\text{ф}12}}.$$

Таким образом, когда электродвигатель ремонтируется с увеличением номинального напряжения, число эффективных проводов в пазу увеличивается, а их сечение уменьшается в одном и том же отношении. Однако уменьшение диаметра неизолированного провода при сохранении марки провода не сопровождается пропорциональным уменьшением диаметра изолированного провода, так как толщина изоляции мало меняется или совсем не меняется, поэтому величина коэффициента заполнения свободного сечения паза $k_{\text{з.с}1}$ может вырасти выше допустимого предела. Поэтому при пересчете на повышенное напряжение стремятся по возможности компенсировать возможное увеличение $k_{\text{з.с}1}$, для этой цели применяют провода с более тонкой изоляцией; уменьшают число параллельных ветвей a_1 в обмотке и уменьшают число параллельных элементарных проводников m_1 в эффективном проводе.

При переходе на пониженное напряжение иногда удается незначительно повысить номинальную мощность благодаря уменьшению числа эффективных проводов в пазу.

Пример. Пересчет обмотки электродвигателя с короткозамкнутым ротором напряжением 220/380 В на напряжение 500 В.

Данные обмотки в заводском исполнении

Тип обмотки	Двухслойная
Число эффективных проводов в пазу	$w_{эф.п1}=54$
Число параллельных ветвей	$a_1=2$
Число элементарных проводников в эффективном проводе	$m_1=1$
Диаметр неизолированного элементарного проводника	1,68 мм
Сечение токоведущей жилы элементарного проводника (по табл. 10)	$q_{эл1}=2,217$ мм^2
Двусторонняя толщина изоляции (по табл. 10)	$2\Delta=0,08$ мм
Марка провода	ПЭВА-2
Диаметр изолированного элементарного проводника	$d_{эл.и1}=1,76$ мм

Расчет

1. При сохранении типа и схемы обмотки числа элементарных проводников в эффективном проводе и числа параллельных ветвей в фазе

$$w_{эф.п12}=w_{эф.п11}\frac{U_{ф12}}{U_{ф11}}=54\frac{500}{380}=71,05$$

округляются до ближайшего четного числа 72.

2. Сечение неизолированного элементарного проводника

$$Q_{эф12}=Q_{эф11}\frac{U_{ф11}}{U_{ф12}}=2,217\frac{380}{500}=1,686\ мм^2.$$

3. Диаметр неизолированного элементарного проводника

$$d_{12}=1,14\sqrt{1,686}=1,5\ мм$$

округляется до ближайшего стандартного диаметра 1,45 мм.

4. Диаметр изолированного элементарного проводника при сохранении марки провода (по табл. 10) $d_{эл.и12}=1,53$ мм.

В связи с уменьшением диаметра провода следует проверить возможность выполнения обмотки при $a_{12}=1$, что облегчит монтаж, пайку и изолировку внутримашинных соединений. При этом возможно в 2 раза уменьшить число эффективных проводов в пазу и вдвое увеличить их сечение:

$$Q_{эф12}=1,686\times2=3,372\ мм^2;$$

$$d_{12}=1,14\sqrt{3,372}=2,09\ мм$$

округляется до ближайшего стандартного диаметра, равного 2,1 мм, и $d_{эл.и12}$ (согласно табл. 10) равен 2,19 мм.

Как указывалось выше, допустима укладка алюминиевого провода диаметром до 2,26 мм. Провод указанного диаметра имеет несколько больший коэффициент заполнения провода, чем примененный в заводском исполнении:

$$\frac{k_{з.п12}}{k_{з.п11}}=\frac{0,73}{0,72}=1,015.$$

Проверим, как при этом изменится коэффициент заполнения свободного сечения паза $k_{з.с12}$.

Для этого следует сравнить величину $w_{эф.п1} d^2_{эл.н1}$ в трех случаях:

первоначальное исполнение при $U=380$ В;
исполнение при $U=500$ В при $a_{12}=2$;
» » U » при $a_{12}=1$;
в первом случае:

$$w_{эф.п11} d^2_{эл.н12} = 54 \cdot 1,76^2 = 187 \text{ мм}^2;$$

во втором случае:

$$w_{эф.п12} d^2_{эл.н12} = 72 \cdot 1,53^2 = 169 \text{ мм}^2;$$

в третьем случае:

$$w_{эф12} d_{эл.н12} = 36 \cdot 2,19^2 = 173 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, в третьем случае коэффициент заполнения свободного сечения пара $k_{з.с12}$ оказывается ниже, чем в первом, что облегчает укладку обмотки в паз, и вариант с $a_{12}=1$ является с этой точки зрения вполне допустимым, а так как при этом упрощается схема обмотки, то и предпочтительным.

Нетрудно убедиться, что при этом варианте и плотность тока в обмотке снижается, так как $2,1^2 > 2 \cdot 1,45^2$.

1-6. РАСЧЕТ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

При пересчете обмотки статора электродвигателя в связи с изменением частоты (скорости) вращения руководствуются следующим.

Из формулы (1) следует, что при сохранении индукции в зазоре и фазного напряжения

$$\frac{p_{11} a_{11}}{w_{эф.п11} k_{об11}} = \frac{p_{12} a_{12}}{w_{эф.п12} k_{об12}}.$$

Здесь и далее к обозначениям, относящимся к старому заводскому исполнению, добавлен индекс 1, к исполнению при ремонте с изменением частоты вращения — индекс 2.

Из приведенного выражения следует, что при изменении частоты вращения n_c следует одновременно изменить и число эффективных проводов в пазу:

$$w_{эф.п12} = w_{эф.п11} \frac{k_{об11} a_{12} p_{12}}{k_{об12} a_{11} p_{11}} = w_{эф.п11} \frac{k_{об11}}{k_{об12}} \frac{a_{12}}{a_{11}} \frac{n_{c1}}{n_{c2}}.$$

При сохранении параметров обмотки и объема тока в пазу

$$Q_{эф.п12} = Q_{эф.п11} \frac{p_1}{p_2} = Q_{эф.п11} \frac{n_{c2}}{n_{c1}}$$

номинальная мощность электродвигателя составит:

$$P_2 = P_1 \frac{p_1}{p_2} = P_1 \frac{n_{c2}}{n_{c1}}.$$

Если обратиться к формулам (1)—(3), то можно заключить, что при уменьшении числа полюсов и неизменных параметрах обмотки пропорционально увеличивается индукция в спинке сердечника статора B_{c1} и спинке сердечника ротора B_{c2}. При увеличении числа полюсов индукция в спинках статора и ротора пропорционально уменьшается. Индукция в зубцах статора и ротора остается неизменной. Поэтому при переходе на большее число полюсов следует в первую очередь проверить получаемые при этом величины индукции в спинках статора и ротора, если они значительно (более чем на 10%) превосходят допустимые, снизить индукцию в зазоре путем пропорционального увеличения числа эффективных проводов в пазу.

Так как увеличение числа эффективных проводов в пазу связано с соответствующим уменьшением их сечения и, следовательно, ухудшением коэффициента заполнения паза, следует по возможности компенсировать это путем применения проводов с более тонкой изоляцией и максимально допустимого диаметра, а также применения более тонкой пазовой изоляции.

Естественно, что снижение индукцни влечет за собой снижение мощности и вращающих моментов электродвигателя (максимальный вращающий момент приблизительно пропорционален квадрату индукции). Поэтому при уменьшении числа полюсов мощность электродвигателя, пересчитанная по приведенной выше формуле (действительной только при сохранении индукции), соответственно снижается. Однако в некоторых случаях, особенно у электродвигателей старых типов и серий, спинки сердечников статора и ротора недостаточно загружены магнитным потоком; при пересчете таких электродвигателей на уменьшенное число полюсов необходимое снижение индукции в зазоре и потеря мощности будут невелики.

Следует помнить, что изменение частоты вращения сказывается на величине потерь на трение и вентиляционных потерь, а также на производительности вентилятора, что также влияет на мощность электродвигателя.

Повышение окружной скорости ротора может ограничиваться механической прочностью его частей. Окружная скорость ротора (м/с), величина которой составляет:

$$v_р = \frac{\pi D_{н2} n_2}{60 \cdot 1\,000},$$

не должна превышать 30—40 м/с для фазного ротора; 40—60 м/с — для короткозамкнутого ротора.

Бандажи ротора при повышении частоты вращения могут нуждаться в усилении. Требуемое число витков бандажа составляет:

$$w_б = \frac{1,63 G D_{ср}}{d_б (R_z - \sigma)} \left(\frac{n}{1\,000}\right)^2,$$

где G — масса лобовой части обмотки с изоляцией, кг; $D_{ср}$ — средний диаметр обмотки в лобовых частях, см; n — номинальная частота вращения ротора, об/мин; $d_б$ — диаметр проволоки бандажа, составляющей в зависимости от диаметра ротора:

Диаметр ротора, мм . . .	100—200	200—400	401—600	601—1 000	Свыше 1 000
Диаметр проволоки, мм . .	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0 .

R_z — допускаемое напряжение растяжения в бандаже, равное 3 000—3 500 кгс/см²;

σ — напряжение в бандаже, возникающее от его массы при вращении:

$$\sigma = 0,3 D_б^2 \left(\frac{n}{1\,000}\right)^2, \text{ кгс/см}^2,$$

где $D_б$ — диаметр бандажа.

При отсутствии проволоки требуемого диаметра и замене ее проволокой другого диаметра, равнопрочный бандаж должен иметь число витков:

$$w_{тр} = w_{зам} \frac{d_{тр}^2}{d_{зам}^2},$$

где $w_{зам}$ — число витков бандажа при замене проволоки; $d_{тр}$ — диаметр требуемой бандажной проволоки; $d_{зам}$ — диаметр заменяющей бандажной проволоки.

По рис. 31 следует проверить прочность конца вала, служащего для насадки соединительных или передаточ-

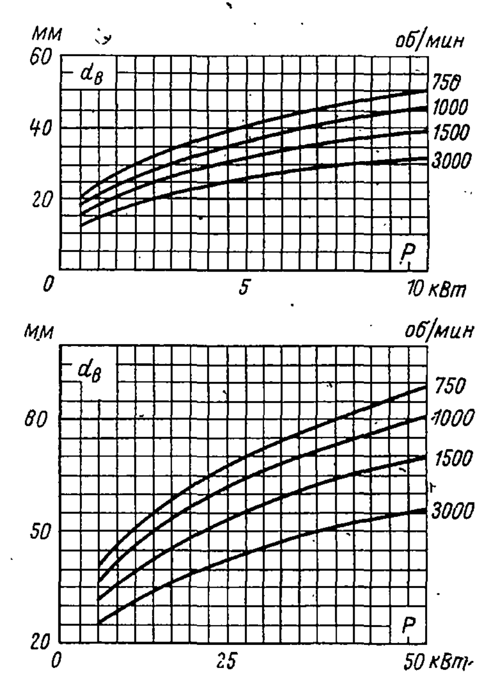


Рис. 31. Допустимая нагрузка на вал.

ных деталей-муфт, шестерен и др. Диаметр конца вала не должен быть меньше значений по кривым рис. 31.

При перемотках обмоток на большую частоту вращения увеличивается шаг обмотки и вылет ее лобовых частей. Поэтому следует проверить допустимость этого с точки зрения обеспечения требуемого изоляционного расстояния между торцовыми крышками и обмоткой.

Также следует проверить по формулам (19) и (20) возможность перевода электродвигателя на новую частоту вращения с точки зрения допустимого соотношения нового, измененного числа полюсов и числа пазов статора и ротора.

Пример пересчета обмотки электродвигателя с частоты вращения 1 500 на 3 000 об/мин.

Технические данные электродвигателя в заводском исполнении

Мощность	$P=5{,}5$ кВт
Напряжение	$U=220/380$ В
Частота вращения (синхронная)	$n_с=1\,500$ об/мин
Вид исполнения	Защищенный

Данные замеров

Статор

Внутренний диаметр сердечника	$D_1=17{,}5$ см
Полная длина сердечника	$l_1=10{,}0$ см
Число вентиляционных каналов	$n_{к1}=2$
Ширина вентиляционных каналов	$b_{к1}=1{,}0$ см
Коэффициент заполнения пакета стали (лаковая изоляция, толщина листов 0,5 мм)	$k_{с1}=0{,}93$
Число пазов	$Z_1=36$
Высота спинки	$h_{с1}=3{,}0$ см
Тип обмотки	Двухслойная
Число эффективных проводов в пазу	$w_{эф.п1}=30$
Число элементарных проводников в эффективном проводе	$m_1=2$
Число параллельных ветвей в фазе	$a_1=1$
Диаметр неизолированного элементарного проводника	$d_1=1{,}25$ мм
Сечение элементарного проводника	$q_{эл1}=1{,}227$ мм^2
Сечение эффективного провода в пазу	$Q_{эф1}=2{,}454$ мм^2

Ротор (короткозамкнутый)

Наружный диаметр сердечника	$D_{н2}=17{,}4$ см
Полная длина сердечника (вентиляционные каналы отсутствуют)	$l_2=10{,}0$ см
Диаметр вала	$d_в=40$ мм
Число пазов	$Z_2=28$
Высота спинки	$h_{с2}=4{,}5$ см

Расчет

1. Проверка соотношения числа полюсов и числа пазов статора и ротора:

$Z_2 \neq 2p(3k+1)$	$28 \neq 8,\ 14,\ 20,\ 26;$
$Z_2 \neq 6pk$	$28 \neq 6,\ 12,\ 18,\ 24;$
$Z_2 \neq Z_1 + p$	$28 \neq 37;$
$Z_2 \neq \frac{Z_1 + 2p}{2}$	$28 \neq 19;$
$Z_2 \neq 2(Z_1 + p)$	$28 \neq 74;$
$Z_2 \neq Z_1 + 2p$	$28 \neq 38;$
$Z_2 \neq Z_1 \pm 2p \pm k$	$28 \neq 30 \div 37,\ 39 \div 42;$
$Z_2 \neq Z_1 \pm 6p \pm k$	$28 \neq 26 \div 29,\ 31 \div 34,\ 38 \div 41,\ 43 \div 46.$

Изменение числа полюсов не вызовет прилипания и застревания ротора, а также повышенного шума при работе электродвигателя.

2. Окружная скорость ротора

$$v_р = \frac{\pi D_{н2} n_2}{60 \cdot 1\,000} = \frac{3,14 \cdot 174 \cdot 3\,000}{60 \cdot 1\,000} = 27,4 \text{ м/с},$$

что значительно ниже предельно допустимой.

3. Прочность свободного конца вала. Согласно рис. 31 конец вала диаметром 40 мм удовлетворяет условию прочности.

4. Полюсное деление

$$\tau_{12} = \frac{\pi D_1}{2p_{12}} \frac{3,14 \cdot 17,5}{2} = 27,5 \text{ см}.$$

5. Активная длина сердечника статора

$$l_{эф1} = k_{c1}(l_1 - n_{к1} b_{к1}) = 0,93(10 - 2 \cdot 1) = 7,45 \text{ см}.$$

6. Активная длина сердечника ротора

$$l_{эф2} = k_{c2} l_2 = 0,93 \cdot 10,0 = 9,3 \text{ см}.$$

7. Число пазов на полюс и фазу обмотки статора

$$q_{12} = \frac{Z_1}{3 \cdot 2p_{12}} = \frac{36}{3 \cdot 2} = 6$$

8. Обмотка статора сохраняется двухслойной, сокращение шага β_{12} принимается равным 0,7.

9. Шаг обмотки статора

$$y_{п1} = \frac{\beta_{12} Z_1}{2p_{12}} = \frac{0,7 \cdot 36}{2} = 12,6, \text{ округляется до } 13.$$

10. Обмоточный коэффициент (согласно табл. 8) $k_{об12} = 0,853$.

11. Число эффективных проводов в пазу при сохранении типа обмотки (предварительно)

$$w_{эф.п12} = w_{эф.п11} \frac{p_{12}}{p_{11}} = 30 \frac{1}{2} = 15.$$

12. Индукция в воздушном зазоре

$$B_{\delta 2} = \frac{2,5 U_ф p_{12} 10^2 a_{11}}{Z_1 D_1 l_1 k_{об11} w_{эф.п12}} = \frac{2,5 \cdot 220 \cdot 1 \cdot 10^2 \cdot 1}{36 \cdot 17,5 \cdot 10,0 \cdot 0,853 \cdot 15} = 0,68 \text{ Тл}.$$

13. Индукция в спинке статора

$$B_{ст2} = 0,58 B_{\delta 2} \frac{D_1}{h_{c1}} \frac{l_1}{l_{эф1}} \frac{1}{p_{12}} = 0,58 \cdot 0,68 \frac{17,5}{3} \frac{10}{7,45} \frac{1}{1} = 3,09 \text{ Тл}.$$

14. Индукция в спинке ротора

$$B_{c12} = 0,58 B_{\delta 2} \frac{D_{н2}}{h_{c2}} \frac{l_2}{l_{эф2}} \frac{1}{p_{22}} = 0,58 \cdot 0,68 \frac{17,4}{4,5} \frac{10,0}{9,3} \frac{1}{1} = 1,63 \text{ Тл}.$$

Индукция в спинке статора превосходит максимально допустимую величину и должна быть снижена. Индукция в спинке ротора находится в допустимых пределах. Индукция в зубцах сердечника статора и ротора не проверяется, так как изменение числа полюсов не влияет на их величину.

Скорректированная индукция в спинке статора B_{c12} принимается равной 1,85 Тл (на 10% выше величины, указанной в табл. 11). В соответствии с этим пересчитывается:

15. $w_{эф.п12} = 15\frac{2,93}{1,85} = 23,8$ — принимается равным 24.

16. $Q_{эф12} = Q_{эф11}\frac{w_{эф11}}{w_{эф12}} = 2,454\frac{30}{24} = 3,06$ мм².

17. При сохранении числа элементарных проводников в эффективном проводе ($m_2 = m_1 = 2$)

$$q_{эл12} = \frac{Q_{эф12}}{2} = \frac{3,06}{2} = 1,53 \text{ мм}^2.$$

18. Диаметр элементарного проводника

$$d_{эл12} = 1,14\sqrt{q_{эл12}} = 1,14\sqrt{1,53} = 1,42 \text{ мм}$$

округляется до ближайшего стандартного диаметра 1,45 мм, чему соответствует сечение $q_{эл12} = 1,651$ мм².

19. Фазный ток в обмотке при плотности тока $j_{12} = 5$ А/мм² (среднее значение по табл. 11)

$$I_{ф12} = j_{12}Q_{эф12} =$$

$$= j_{12}q_{эл12}m_1 = 5,0 \cdot 1,651 \cdot 2 = 16,5 \text{ А}.$$

20. Кажущаяся мощность, потребляемая электродвигателем,

$$P' = \frac{3U_{ф12}I_{ф12}}{1\,000} = \frac{3 \cdot 220 \cdot 16,5}{1\,000} = 10,9 \text{ кВ·А}.$$

21. Номинальная мощность электродвигателя при $k_з = 0,75$ (согласно табл. 9)

$$P = P'k_з = 10,9 \cdot 0,75 = 8,2 \text{ кВт}.$$

Глава вторая

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕМОНТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ АЛЮМИНИЕВЫХ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ

2-1. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РЕМОНТА

Ремонт электродвигателей с обмоткой статора, выполненной из алюминиевого обмоточного провода, производят в соответствии с техническими условиями, регламентирующими взаимные обязательства заказчика и ремонтной организации.

Министерством электротехнической промышленности СССР выпущены технические условия на ремонт электрических машин, производимый ремонтным предприятием ТУ16-519.002-71 «Ремонт электрических машин переменного тока», которые распространяются на ремонт электродвигателей с алюминиевой обмоткой статора.

Этими техническими условиями предусматриваются виды ремонта: капитальный и средний.

К капитальному ремонту относятся: полная разборка электродвигателя, замена обмоток статора и ротора; ремонт беличьей клетки короткозамкнутого ротора; ремонт активной стали статора; ремонт или замена подшипников; ремонт валов, вентиляторов и их кожухов, подшипниковых щитов и корпусов; ремонт или замена контактных колец, щеткодержателей и других узлов.

При среднем ремонте производятся: замена или перепайка бандажей фазного ротора; переизолировка и покрытие лаком или эмалью лобовых частей обмоток; проточка контактных колец; ремонт щеточного механизма; ремонт подшипников скольжения; замена подшипников качения, уплотнений и крепежных деталей.

Таким образом, замену медных обмоточных проводов алюминиевыми производят только при капитальном ремонте.

Передачу и приемку в ремонт производят на основании письменного заказа, в котором указывают паспортные данные электродвигателя, подлежащего ремонту, а также требования, которым должен удовлетворять отремонтированный электродвигатель — напряжение, частота вращения и др.

Принимают в ремонт комплектные электродвигатели, т. е. имеющие все основные узлы и детали, включая старую обмотку.

Величина воздушного зазора между ротором и статором не должна быть выше заводской:

на 25% — для двухполюсных электродвигателей;

на 15% — для электродвигателей с числом полюсов четыре и более.

При отсутствии заводских данных допустимую величину воздушного зазора определяют по табл. 12.

Раскомплектованные, а также электродвигатели с разбитым корпусом, значительным повреждением активной стали, с отбитыми тремя или четырьмя лапами ремонту не подлежат.

Изменение параметров электродвигателя, а также изготовление обмотки статора из алюминиевого обмоточного провода вместо медного предварительно согласовываются заказчиком и ремонтной организацией.

При приемке электродвигателя в ремонт производят только его наружный осмотр. Если при его разборке во время ремонта выявится невозможность или нецелесообразность ремонта, электродвигатель возвращают заказчику с соответствующим актом, в котором указывают причины отказа от ремонта.

Техническими условиями предусматриваются следующие основные положения, обеспечивающие эксплуатационную надежность отремонтированного электродвигателя: класс нагревостойкости примененных материалов должен быть не ниже, чем по исполнению завода-изготовителя. Как указывалось в гл. 1, для сохранения номинальной мощности электродвигателя или снижения ее в минимальном размере необходимо применение электроизоляционных материалов более высокого класса нагревостойкости (класса E вместо A).

Согласно пп. 1.19-1.21 ГОСТ 183-66 предельно допускаемое превышение температуры (°С) при электроизоляционных материалах класса E составляет:

Для обмотки статора при измерении методом термометра	65
То же при измерении методом сопротивления	75
Для обмотки ротора вне зависимости от метода измерения	80
Для контактных колец при измерении методом термометра	70
Для сердечников и других стальных частей, соприкасающихся с обмоткой при измерении методом термометра	75
Для сердечников и других стальных частей, не соприкасающихся с обмотками—не больше значений, которые создавали бы опасность повреждения изоляционных или других смежных материалов	

Электродвигатель после ремонта должен быть укомплектован и очищен; обмотки надежно закреплены. Поверхности обмоток и сердечников, детали крепления и внутримашинные соединения должны быть отлакированы; внутренняя поверхность подшипниковых щитов, вентиляторов и наружная поверхность окрашены, а конец вала покрыт лаком или консервационной смазкой; неравномерность воздушного зазора должна быть в пределах ±10% среднего значения; подшипники должны работать спокойно без течи масла. Температура подшипников скольжения не должна превышать 80°С (температура масла при этом не должна быть более 65°С), подшипни-

ков качения 100 °С. Подшипники должны быть заполнены смазкой. Бандажи должны быть выполнены из проверенной бандажной проволоки или из стекловолокнистой ленты ЛСБ-В или ЛСБ-F. Проволочные бандажи должны быть наложены без пропусков и перекрещиваний, концы проволоки надежно закреплены, поверхность бандажа тщательно пропаяна, без черновин и пятен. Электродвигатели с перепаянными или вновь наложенными бандажами должны без повреждений и остаточных деформаций выдерживать повышение частоты вращения в течение 2 мин на 20% сверх номинальной; бой контактных колец не должен превышать: 0,1 мм — при частоте вращения 1 500—3 000 об/мин и 0,2 мм — при 1 000 об/мин и менее.

Поверхность колец должна быть шлифованной, а щетки (соответствующей марки) хорошо притерты к их поверхности. Нажатие пружин должно соответствовать марке щеток. Зазор между щеткой и обоймой щеткодержателя должен быть в пределах 0,1—0,3 мм, а между щеткодержателем и контактным кольцом в пределах 2—3 мм. Механизм короткого замыкания контактных колец должен быть отрегулирован и обеспечивать надежный контакт на всех фазах; максимальная вибрация не должна превышать:

Для электродвигателей 3 000 об/мин	—0,05 мм
Для электродвигателей 1 500 об/мин	—0,10 мм
Для электродвигателей 1 000 об/мин и ниже	—0,12 мм

В нагретом состоянии электродвигатель должен выдерживать перегрузку по току на 50% в течение 2 мин.

Сопротивление изоляции каждой обмотки электродвигателя относительно корпуса и между обмотками должно удовлетворять требованиям п. 1.28 ГОСТ 183-66. Согласно этим требованиям величина сопротивления изоляции должна быть не менее значения, полученного по формуле (но не менее 0,5 мОм), мОм,

$$r = \frac{U}{1\,000 + 0,01P},$$

где U — номинальное напряжение, В; P — номинальная мощность, кВ·А.

Эта формула относится к измерению сопротивления при рабочей температуре обмотки. Когда измерение производится при более низкой температуре, полученное по

этой формуле значение сопротивления изоляции следует удвоить на каждые 20 °С (полные или неполные) разности между рабочей температурой обмотки и температурой, при которой выполнено измерение.

Например, для электродвигателя переменного тока мощностью $P=40$ кВ·А, напряжением $U=380$ В сопротивление изоляции при рабочей температуре обмоток (100 °С) должно быть не менее

$$r=\frac{380}{1\,000+0{,}01\cdot 40}=0{,}38\ \text{мОм}.$$

Если же измерение производится при 15 °С, то полученное значение должно быть удвоено:

$$\frac{100-15}{20}=4{,}25\ \text{раза (с округлением 5 раз)}$$

и таким образом должно составлять $0{,}38\cdot 2^5=12$ мОм.

Электрическая прочность изоляции каждой обмотки электродвигателя относительно корпуса и между обмотками после капитального ремонта должна удовлетворять требованиям п. 1.26 ГОСТ 183-66. Величина испытательного напряжения согласно этим требованиям приведена в табл. 28.

Таблица 28

Наименование	Напряжение электродвигателя, В	Мощность электродвигателя	Испытательное напряжение
Обмотка статора асинхронного двигателя	Ниже 100	Менее 1 кВт (кВ·А)	500 В+2U
	» »	От 1 кВт (кВ·А) и выше	1 000 В+2U
	Выше 100	До 1 000 кВт (кВ·А)	1 000 В+2 U, но не менее 1 500 В
Обмотка фазного ротора асинхронного двигателя	Любое	Любая	1 000 В+2$U_к$

Примечания: 1. Величина испытательного напряжения относится к электродвигателям, полностью перемотанным на специализированных электроремонтных заводах (цехах) или на местах установки. При испытании после монтажа (перед сдачей в эксплуатацию) электродвигателей, полностью перемотанных на специализированном электроремонтном предприятии, электрическую прочность испытывают напряжением, равным 80% указанного в таблице.

2. После среднего ремонта электрическую прочность изоляции испытывают напряжением, равным 85% указанного в таблице.

3. U — номинальное напряжение двигателя В; $U_к$ — напряжение на кольцах при разомкнутом неподвижном роторе и номинальном напряжении на статоре, В.

4. Испытание производят после замера сопротивления изоляции и только при удовлетворительных результатах замера.

Электрическая прочность изоляции между смежными витками обмотки после капитального или среднего ремонта должна удовлетворять требованиям п. 1.27 ГОСТ 183-66. Испытание проводят при холостом ходе электродвигателя путем повышения подводимого напряжения на 30% номинального. Допускается применение специальных испытательных устройств, основанных на принципе использования напряжения повышенной частоты. Испытательное напряжение выдерживают в течение 5 мин: у электродвигателей с фазным ротором — при разомкнутой обмотке ротора, у короткозамкнутых двигателей — при холостом ходе.

У электродвигателей с неподвижным фазным ротором и разомкнутой обмотке ротора при подведении к обмотке статора трехфазного напряжения, повышенного на 30% номинального, испытывают одновременно межвитковую изоляцию обмотки статора и межвитковую изоляцию ротора.

Однако у некоторых двигателей с фазным ротором и малым числом полюсов при таком испытании потребляемый ток намного превосходит номинальное значение, что вызывает опасное повышение температуры обмотки статора, бандажей и т. д.; у таких электродвигателей допускается раздельное испытание межвитковой изоляции обмоток статора и ротора: сначала производят испытание для обмотки статора при замкнутом накоротко и вращающемся роторе повышением подведенного к обмотке статора напряжения до 130% номинального, а затем для обмотки ротора при разомкнутой обмотке ротора и вращении с номинальной скоростью посторонним двигателем против направления вращения поля статора, подведением к обмотке статора напряжения, составляющего 65% номинального. При таком испытании наведенное в обмотке ротора напряжение будет составлять 130% номинального.

Как указывалось, для испытания межвитковой изоляции обмоток допускается применение специальных устройств, основанных на принципе использования напряжения повышенной частоты.

Величина напряжения при этом способе испытания не нормирована ГОСТ 183-66; рекомендуемое значение — 150—200 В на один виток.

Выводные концы обмоток электродвигателя должны иметь обозначение (маркировку) в соответствии с п. 3

Таблица 29

Схема соединений обмотки	Число выводов	Название вывода	Обозначение вывода	
			Начало	Конец
Открытая схема	6	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	C1 C2 C3	C4 C5 C6
Соединение звездой	3 или 4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нулевая точка	C1 C2 C3 0	
Соединение треугольником	3	Первый зажим Второй зажим Третий зажим	C1 C2 C3	

ГОСТ 183-66. Эта маркировка для обмотки статора указана в табл. 29, а для обмотки ротора — в табл. 30.

Контактные кольца обозначают так же, как присоединенные к ним выводы обмотки ротора; при этом расположение контактных колец должно быть в порядке

Таблица 30

Число выводов на контактных кольцах	Название вывода	Обозначение вывода	Число выводов на контактных кольцах	Название вывода	Обозначение вывода
3	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	P1 P2 P3	4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нулевая точка	P1 P2 P3 0

цифр, указанных в таблице, а кольцо P1 должно быть наиболее удаленным от обмотки ротора. Обозначение самих колец буквами — необязательно.

На отремонтированном электродвигателе рядом с заводским щитком устанавливают новый, на котором указывают: наименование ремонтного предприятия; мощность — кВт; напряжение — В; номинальный ток статора — А; коэффициент полезного действия — %; коэффи-

циент мощности; ток ротора — А; ремонтный номер; дату выпуска из ремонта.

После ремонта каждый электродвигатель подвергается обязательным приемо-сдаточным испытаниям.

Ремонтная организация гарантирует исправную работу электродвигателя при надлежащих условиях его хранения, транспортировки, монтаже и эксплуатации в течение определенного так называемого гарантийного срока. В настоящее время этот срок составляет 12 мес.

2-2. ПРЕДРЕМОНТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Не редки случаи, когда в ремонт поступают совершенно исправные электродвигатели, демонтированные и направленные в ремонт из-за неисправности питающей сети или приводимого механизма. Поэтому из принятых в ремонт отбирают те электродвигатели, которые, судя по наружному осмотру, можно отремонтировать без замены обмотки или с ее частичной заменой.

Отобранные электродвигатели подвергают предремонтным испытаниям, предварительно убедившись, нет ли у них механических дефектов, препятствующих включению электродвигателя под напряжение: задевания ротора за статор, заедания подшипников, поломки вала или подшипникового щита и др., а также проверяют (лампой) нет ли обрыва фаз.

В предремонтные испытания входят:

измерение сопротивления изоляции обмоток статора и ротора (фазного электродвигателя) относительно корпуса и между обмотками.

Для электродвигателей с номинальными напряжениями до 500 В включительно измерение сопротивления изоляции производят мегомметром на 500 В; для электродвигателей с номинальным напряжением свыше 500 В — мегомметром на 1 000 В.

Если в электродвигателе выведены шесть выводов (начало и конец каждой фазы), то поочередно измеряют сопротивление изоляции каждой фазы обмоток относительно двух других фаз, соединенных с корпусом электродвигателя.

Следует отметить, что сопротивление изоляции неповрежденных обмоток, не чрезмерно загрязненных и не увлажненных, обычно значительно выше, чем вычисленное по приведенной формуле (стр. 111).

испытание электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса электродвигателя и между обмотками.

Испытание производят специальным испытательным трансформатором, приложением напряжения требуемой величины, частотой 50 Гц и практически синусоидальным в течение 1 мин. Нормативы для определения испытательного напряжения приведены в табл. 28. Так же как и при измерении сопротивления изоляции, если выведено начало и конец каждой фазы, испытывают поочередно каждую фазу. При этом один вывод источника испытательного напряжения подключают к выводу испытуемой фазы, а другой надежно заземляют и подключают к заземленному корпусу электродвигателя, с которым на время испытания данной фазы обмотки соединяют две другие фазы. Результаты испытания считаются удовлетворительными, если не произошло пробоя изоляции или перекрытия ее скользящими разрядами;

испытание междувитковой изоляции обмоток. Как указывалось, изоляция между смежными витками обмоток должна выдержать в течение 5 мин испытание повышенным напряжением. Это испытание проводят при холостом ходе электродвигателя путем повышения подводимого напряжения на 30% номинального.

Из специальных испытательных устройств, основанных на принципе использования напряжения повышенной частоты, рекомендуются аппараты СМ-1, ВЧФ-2, С-5П-ВЭИ;

испытание на холостом ходу. Испытание имеет цель определить величину тока холостого хода, проверить состояние механической части электродвигателя — проверить нагрев подшипников, отсутствие заедания ротора при вращении, стука и постороннего шума. Кроме того, как это указывалось выше, при холостом ходе электродвигателя испытывается витковая изоляция обмоток.

Ток холостого хода не является величиной, нормируемой ГОСТ, но его превышение сверх нормального заводского значения может свидетельствовать о некоторых дефектах электродвигателя; аксиальном смещении статора по отношению к ротору, увеличении воздушного зазора между статором и ротором, уменьшении при предыдущих ремонтах числа витков в обмотке статора и др.

Отношение тока холостого хода к номинальному не должно превышать предельных значений, указанных на рис. 32 и 33.

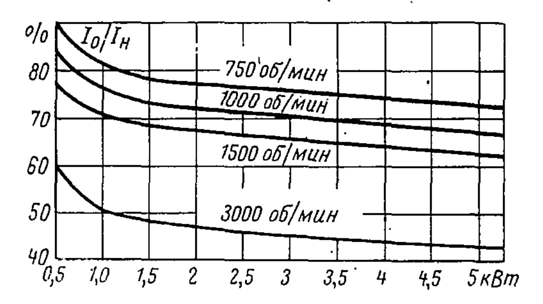


Рис. 32. Кривые предельных значений тока холостого хода асинхронных электродвигателей мощностью до 5 кВт.

Испытание производят в течение 30 мин: токи холостого хода измеряют пофазно и определяют среднее арифметическое значение; неравномерность тока холо-

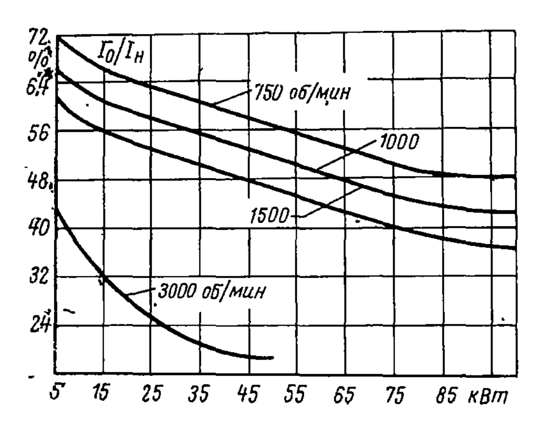


Рис. 33. Кривые предельных значений тока холостого хода асинхронных электродвигателей мощностью 5—100 кВт.

стого хода по отдельным фазам не должна быть больше 4,5% среднего значения. Температура подшипников при испытании не должна превышать 60 °С.

2-3. ИСПОЛНЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ И ОСНОВНЫЕ РЕМОНТНЫЕ ОПЕРАЦИИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ОБМОТОК АЛЮМИНИЕВЫМИ ПРОВОДАМИ (НАМОТКА КАТУШЕК, МЕЖКАТУШЕЧНЫЕ, МЕЖГРУППОВЫЕ И ВЫВОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, СУШКА И ПРОПИТКА ОБМОТОК)

Технологический процесс ремонта электродвигателей с алюминиевой обмоткой статора принципиально не отличается от процесса ремонта электродвигателей с медной обмоткой. Описание этих процессов нами не приводится, так как это достаточно освещено в технической литературе.

Однако следует отметить, что если максимальный диаметр медного обмоточного провода для всыпных обмоток статора 1,68 мм, то для алюминиевого, более мягкого и эластичного, диаметр неизолированного провода может быть увеличен до 2,26 мм.

Исполнение изоляции обмоток статора из алюминиевого провода рекомендуется выполнять при ремонте в соответствии с табл. 31. Это исполнение изоляции соответствует классу нагревостойкости Е.

Катушки всыпных обмоток (мягкие секции) заготовляют на специальных шаблонах. Можно рекомендовать универсальный шаблон, разработанный ЦКТБЭР * Главэлектроремонта (чертеж 5СД.487.129), рассчитанный на изготовление катушек обмотки статора любого электродвигателя мощностью от 0,6 до 100 кВт.

Шаблон сконструирован применительно к электродвигателям единой серии А и АО, но может быть использован и при ремонте других серий. В конструкции шаблона предусмотрена возможность изготовления сразу целой катушечной группы, что упрощает изготовление обмотки, уменьшает трудоемкость и приводит к экономии обмоточных проводов и припоя.

Много времени затрачивается на снятие намотанных катушек с шаблона. Ускорение снятия катушек достигается применением шарнирного шаблона (рис. 34). Для этого отвинчивают гайку *7* и снимают накладку *6*. При выдвижении оси *1* и накладки *2* влево планки *3* и *5* поворачиваются вокруг осей. Головки шаблона *4* сходятся

* Центральное конструкторско-технологическое бюро по ремонту и модернизации промышленного электрооборудования.

Таблица 31

Изоляция	Электродвигатели нормального исполнения габаритов		Электродвигатели химостойкого и влагостойкого исполнения
	1—5	6—9	
Пазовая изоляция	Пленкоэлектрокартон на полиэтилентерефталатных пленках, СТУ 36-14-02-64, толщиной 0,27 мм, один слой или пленка полиэтилентерефталатная марки П ЭФ, МРТУ 6-11-30-65, толщиной 0,05 мм, два слоя и картон электроизоляционный марки ЭВ, ГОСТ 2824-60, толщиной 0,2 мм один слой, склеенные лаком марки ПЭ-933, ТУ6—10-714-68	Пленкоэлектрокартон на полиэтилентерефталатных пленках, СТУ 36-14-02-64, толщиной 0,27 мм, два слоя или электронит, ТУ 3485-58, толщиной 0,2 мм, один слой, гибкий миканит марки ГФС, ГОСТ 6120-61, толщиной 0,2 мм, один слой и стеклолакоткань марки ЛСП, ТУ 35-ЭП-286-64, толщиной 0,15 мм, один слой, склеенные лаком ПЭ-933, ТУ6—10-714-68	Стекломиканит гибкий марки Г₁ФГІ, ГОСТ 8727-69, толщиной 0,22 мм, один слой и стеклолакоткань марки ЛСП, ТУ 35-ЭП-286-64, толщиной 0,11 мм, один слой, склеенные лаком ПЭ-933, ТУ6—10-714-68
Междуслойная изоляция в пазу	Пленкоэлектрокартон на полиэтилентерафталатных пленках, СТУ-36-14-02-64, толщиной 0,27 мм, один слой или картон электроизоляционный марки ЭВ, ГОСТ 2824-60, толщиной 0,2 мм, один слой и стеклолакоткань марки ЛСП, ТУ 35-ЭП-286-64, толщиной 0,15 мм, один слой, склеенные лаком ПЭ-933, ТУ6-10-714-68	Пленкоэлектрокартон на полиэтилентерефталатных пленках, СТУ 36-14-02-64, толщиной 0,27 мм, два слоя или электронит ТУ 3485-58, толщиной 0,2 мм, один слой, гибкий миканит марки ГФС, ГОСТ 6120-61, толщиной 0,2 мм, один слой и стеклолакоткань марки ЛСП, ТУ35-ЭП-286-64, толщиной 0,15 мм, один слой, склеенные лаком ПЭ-933, ТУ6—10-714-68	Стекломиканит гибкий марки Г₁ФГІ, ГОСТ 8727-69, толщиной 0,22 мм, один слой и стеклолакоткань марки ЛСП, ТУ 35-ЭП-286-64, толщиной 0,11 мм, один слой, склеенные лаком ПЭ-933, ТУ 6-10-714-68

Продолжение табл. 31

Изоляция	Электродвигатели нормального исполнения габаритов		Электродвигатели химостойкого и влагостойкого исполнения
	1—5	6—9	
Междуфазная изоляция в лобовых частях	Пленкоэлектрокартон на полиэтилентерефталатных пленках, СТУ 36-14-02-64, толщиной 0,27 мм, один слой или электронит, ТУ 3485-58, толщиной 0,5 мм, один слой, гибкий миканит марки ГФС, ГОСТ 6120-61, толщиной 0,2 мм, один слой и стеклолакоткань марки ЛСП, ТУ 35-ЭП-286-64, толщиной 0,15 мм, один слой, склеенные лаком ПЭ-933, ТУ6-10-714-68	Пленкоэлектрокартон на полиэтилентерефталатных пленках, СТУ 36-14-02-64, толщиной 0,27мм, два слоя или электронит, ТУ3485-58, толщиной 0,2 мм, один слой, гибкий миканит марки ГФС, ГОСТ 6120-61, толщиной 0,2 мм, один слой и стеклолакоткань марки ЛСП, ТУ 35-ЭП-286-64, толщиной 0,15 мм, один слой, склеенные лаком ПЭ-933, ТУ6-10-714-68	Стекломиканит марки Г,ФГI, ГОСТ 8727-69, толщиной 0,22 мм, один слой и стеклолакоткань марки ЛСП ТУ 35-ЭП-286-64, толщиной 0,11 мм, один слой, склеенные лаком ПЭ-933, ТУ 6-10-714-68
Клин пазовый	Дерево твердых пород ГОСТ 2695-62	Дерево твердых пород ГОСТ 2695-62 или прессматериал марки АГ-4, ГОСТ 10087-62	Стеклотекстолит марки СТЭФ, ГОСТ 12652-67
Шнур бандажировочный	Шнур хлопчатобумажный ТУ 1365-51	Шнур хлопчатобумажный ТУ 1365-51 или стеклочулок марки АСЭЧ(б), ТУМЛП 1503-48	Стеклочулок марки АСЭЧ(б), ТУМЛП 1503-48 или стеклолента толщиной 0,1—0,2 мм ГОСТ 5937-68
Изоляция выводов катушек, межкатушечных соединений и мест паек	Трубки электроизоляционные марки ТЭЛ, ТУ 17-65 ТомНИИКП или марки ТЭС, ГОСТ 10699-63 или марки ТЛВ, ГОСТ 9614-61	Трубки электроизоляционные марки ТЭЛ, ТУ 17-65 ТомНИИКП или марки ТЭС, ГОСТ 10699-63 или марки ТЛВ, ГОСТ 9614-61 или стеклолакотрубки марки ТКС, ГОСТ 10699-63	Стеклолакотрубки марки ТКС, ГОСТ 10699-63

к центру, тем самым освобождая все намотанные катушки. Катушки наматывают на специальных намоточных станках, снабженных счетчиком оборотов. При небольшом объеме работ пользуются ручными станками (рис. 35). Более совершенными с электрическим приводом являются станки типа ТТ-20, ТТ-21 и ТТ-22, изготовляемые машиностроительным заводом в г. Фрунзе.

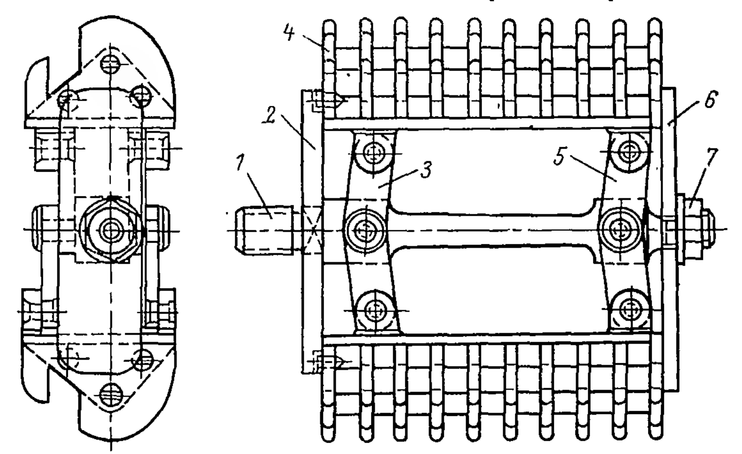


Рис. 34. Шарнирный намоточный шаблон.

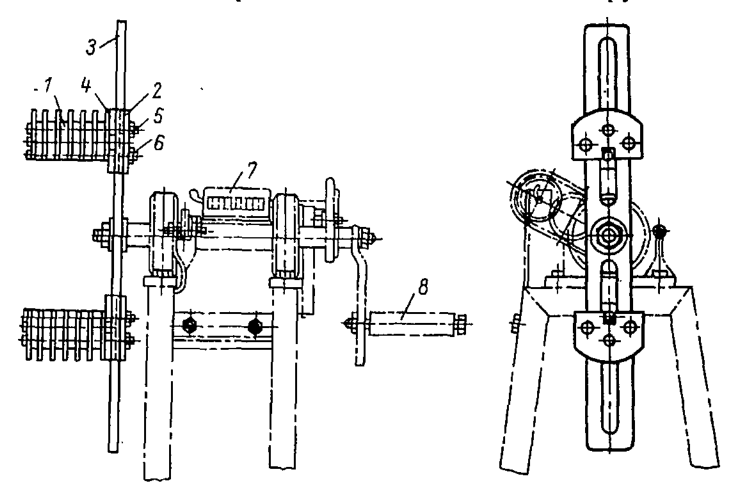


Рис. 35. Ручной станок для намотки катушек.

1 — колодка шаблона; *2* — планки; *3* — коромысло; *4* — ползун; *5* — шпилька; *6* — гайка; *7* — счетчик оборотов; *8* — ручка.

Перед началом намотки катушки подготовляют необходимое число барабанов по числу элементарных проводников в эффективном проводе, пропускают концы всех проводов через линоксиновую трубку так, чтобы их удобно было держать рукой в процессе намотки. В случае обрыва провода или окончания провода на бухте, отрезают провод с таким расчетом, чтобы место его соединения пришлось на лобовую часть катушки, и припаивают конец провода новой бухты.

Чтобы правильно выбрать шаблон для намотки катушки, необходимо знать размеры катушки — размеры ее прямолинейной и лобовой части.

Определение длины прямолинейной части не вызывает особой трудности, но длину лобовой части, которая зависит как от шага, так и от вылета обмотки, определить не так просто.

Обычно определяют размер катушки по нижеуказанным приближенным формулам, изготовляют одну-две пробные катушки и уточняют размеры по месту, вкладывая пробные катушки в пазы.

Средняя длина полувитка (см) определяется формулой

$$l_{пол} = l_1 + l_л,$$

где l_1 — длина сердечника активной стали, см; $l_л$ — длина половины лобовой части, включающая два прямолинейных участка, являющихся продолжением пазовой части катушки, и два изогнутых участка, см.

Для приближенного определения $l_л$ вычисляют ширину катушки (см) по дуге, проходящей через середины пазов, в которые катушки укладываются:

$$\tau_к = \frac{\pi\beta_1(D_1 + h_{п1})}{2p},$$

где β_1 — коэффициент укорочения шага; D_1 — внутренний диаметр сердечника статора, см; $h_{п1}$ — высота паза, см.

По величине $\tau_к$ приближенно определяют длину $l_л$ (см):

а) для двухслойной катушечной обмотки

$$l_л = k\tau_к + 3,$$

где коэффициент k принимается в зависимости от числа полюсов:

$2p$ . .	2	4	6	8
k . . .	1,3	1,35	1,45	1,55

б) для однослойной концентрической обмотки приближенную величину $l_л$ определяют путем деления результата подсчета по вышеприведенной формуле на коэффициент 1,12.

Уточнение размеров лобовой части пробной катушки по месту является очень важной и ответственной операцией. Дело в том, что для обеспечения надежности отремонтированного электродвигателя необходимо, чтобы лобовые части везде отстояли от торцовых щитов не менее чем на 5 мм; это должно быть обеспечено уже при укладке катушек обмотки, так как попытка изменить величину вылета лобовой части уже пропитанной и высушенной обмотки путем подбивки как в осевом, так и в радиальном направлении неминуемо влечет за собой повреждение изоляции. Особенно важно соблюдать размеры осевых и радиальных вылетов лобовых частей обмотки при их пропитке термореактивными лаками, обычно применяемыми при ремонте электродвигателей с обмотками из алюминиевого провода, так как при этих лаках лобовые части обмотки превращаются в монолитный узел.

Для контроля размеров лобовых частей рекомендуется применять специальные шаблоны; альбом таких шаблонов разработан ЦКТБЭР Главэлектроремонта.

Основная технологическая особенность ремонта электродвигателей с применением алюминиевого обмоточного провода заключается в способах лужения и пайки проводов. Приходится считаться со специфической особенностью алюминия, его быстрой окисляемостью в расплавленном состоянии, влекущей за собой образование трещин и расслоений по окисленной поверхности. Образующаяся на поверхности пленка — химически стойкая, весьма тугоплавкая и малопроводящая.

Долгое время считали, что практически невозможно обеспечить надежность всех паяных соединений алюминиевых проводов обмотки электродвигателя по механической прочности и приемлемой величине электрического сопротивления места пайки даже при соблюдении всех режимов пайки. Это предубеждение в течение долгого времени ограничивало применение алюминиевого провода при изготовлении и ремонте электродвигателей.

С течением времени процессы лужения и пайки алюминиевых проводов были достаточно усовершенствованы, технологические операции и режимы полностью отрабо-

таны и освоены и в настоящее время с достаточным основанием можно считать, что лужение и пайка алюминиевых проводов, хотя и несколько сложнее медных и требует более высокой квалификации пайщиков, но получаемое соединение не уступает по надежности соединению медных проводов. Ниже приводятся методы и способы выполнения, а также конструкции соединения алюминиевых проводов между собой и с медными провода-

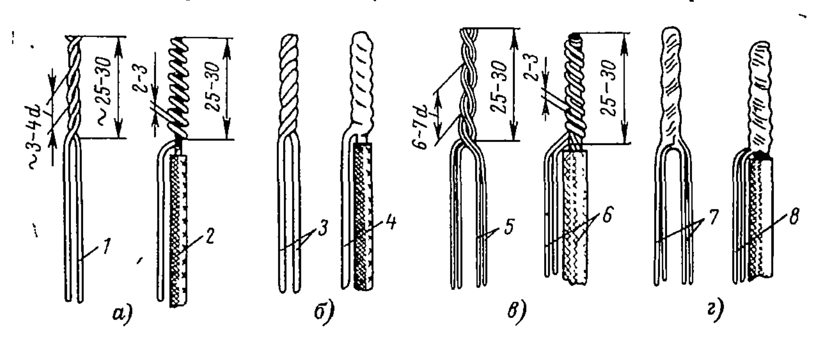


Рис. 36. Межкатушечные и выводные соединения при пайке погружением.

1, 3, 5 и *7* — межкатушечные соединения; *2, 4, 6* и *8* — выводные соединения; *а* и *в* — после скрутки; *б* и *г* — после пайки; *d* — диаметр алюминиевого провода.

ми, применяемые материалы и приспособления, а также технология производства работ. Следует иметь в виду, что эти указания должны выполняться строго, так как несоблюдение технологии пайки влечет за собой разрушение паек из-за недостаточной механической прочности или в результате коррозии.

Применяют следующие виды соединения алюминиевых проводов.

Пайка способом погружения. Соединяемые концы облуживают, скручивают, покрывают флюсом и окунают в ванну с расплавленным припоем. Этот способ применяют для внутрикатушечных соединений алюминиевых проводов между собой, а также для выводных соединений алюминиевых проводов с медными в электродвигателях до 6-го габарита включительно. На рис. 36 указана конструкция межкатушечных и выводных соединений при пайке погружением.

Пайка способом заливки. Соединяемые концы облуживают, собирают встык в разборной форме и заливают

место стыка расплавленным припоем. Этот способ применяют для межкатушечных соединений алюминиевых проводов, а также для выводных соединений алюминиевых проводов с медными в электродвигателях 7-го габарита и выше. На рис. 37 указана конструкция внутрикатушечных и выводных соединений при пайке способом заливки.

Сварка способом контактного нагрева. Сваривание производят по торцам соединяемых проводов за счет

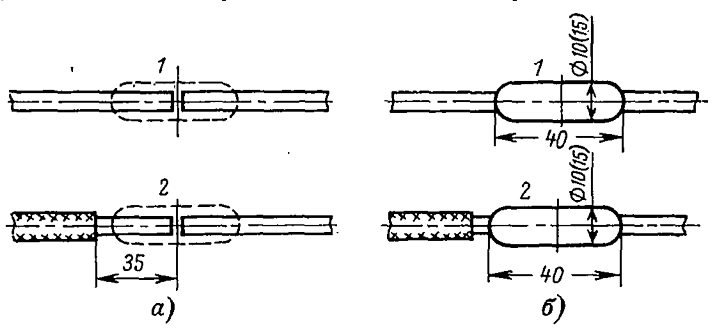


Рис. 37. Межкатушечные и выводные соедиения при пайке заливкой.

1 — межкатушечное соединение; 2 — выводное соединение; а — после сборки; б — после пайки. Размеры в скобках — для электродвигателей 9-го габарита.

тепла, выделяющегося в месте контакта их с токоведущими графитовыми губками ручных клещей и графитовым электродом. Этот способ применяют для межкатушечных соединений алюминиевых проводов между собой в электродвигателях до 6-го габарита включительно. На рис. 38 дана конструкция межкатушечного соединения при сварке контактным нагревом.

Для лужения и пайки пользуются припоями (табл. 32) и флюсами (табл. 33); в таблицах указаны их химический состав, свойства, назначение и способ приготовления.

Для герметизации — защиты мест соединений от коррозии, пользуются глифталевым лаком ГФ-95 (бывш. 1154).

Участки лужения, пайки и сварки проводов необходимо оборудовать приточно-вытяжной вентиляцией. Лица, занятые приготовлением припоев, лужением, пайкой и сваркой проводов, должны пройти соответствующий инструктаж по правилам техники безопасности; работы

Таблица 32

Марка припоя	Химический состав, %						Температура полного расплавления, °C	Температура пайки, °C	Плотность, г/см³	Удельное сопротивление, Ом·мм²/м	Назначение	Способ приготовления
	Олово О1 ГОСТ 860-60	Цинк ЦО ГОСТ 3640-65	Кадмий КдО ГОСТ 1467-67	Алюминий АОО ГОСТ 3949-54	Медь МО ГОСТ 859-66	Всего примесей						
П250А	79—81	19—21	—	—	—	0,15	250	300	7,3	0,106	Лужение концов алюминиевых проводов и медных выводов, а также пайка погружением алюминиевых проводов с алюминиевыми и медными	Подогреть тигель до 450°С и загрузить цинк. После расплавления цинка при температуре 450—500°С ввести входящие в состав шихты металлы—алюминий и медь. Легкоплавкие компоненты шихты—олово и кадмий вводить в сплав незадолго до его разливки. Расплавленную шихту припоя тщательно перемешать стальной или графитовой мешалкой и рафинировать канифолью из расчета 0,015% веса шихты, а припой „Б"—обезвоженным хлористым цинком из расчета 0,02—0,04% веса шихты. Через 5—10 мин после рафинирования снять шлак с поверхности расплава, взять пробу на химический анализ и разлить припой по изложницам или в прутки. Припой П250А разливать при температуре 320—350°С, припой П300А при 380—400°С, припой „Б" при 500—550°С
П300А	—	59—61	39—41	—	—	0,045	310	360	7,73	0,067	То же	
„Б"	—	80	—	12	8	0,5	410	700—750	—	—	Пайка заливкой алюминиевых проводов с алюминиевыми и медными	

Таблица 3з

Марка флюса	Составляющие компоненты	Состав, %	Внешний вид	Коррозионное действие (без промывки мест пайки)		Назначение	Способ приготовления
				на алюминий	на медь		
Ф59А	Кадмий борфторид (с содержанием безводного продукта $Cd(BF_4)$ не менее 72%), ВТУ ГКХ 1527-61	10	Однородная вязкая жидкость коричневого цвета	Не оказывает	Оказывает	Лужение концов алюминиевых проводов под пайку способами погружения и заливки	Борфториды кадмия и цинка поместить в одну фарфоровую ступу, а борфторид аммония—в другую. Затем в каждую ступку добавлять понемногу, триэтаноламина и тщательно растирать его в течение 10 мин. После этого в каждую ступку разлить поровну остальное количество триэтаноламина и тщательно перемешивать в течение 4 ч. Раствор борфторида кадмия и цинка в триэтаноламине влить в раствор борфторида аммония в триэтаноламине и перемешивать в течение 20—30 мин. Готовый флюс хранить в затемненной стеклянной таре с притертой пробкой
	Цинк борфторид (с содержанием безводного продукта $Zn(BF_4)$ не менее 69%), ТУ ГКХ 1528-61	3					
	Аммоний борфторид (с содержанием безводного продукта не менее 95 %), ВТУ ГКХ 1526-61	5					
	Триэтаноламин, ТУМХП 1931-49	82					

Продолжение табл. 33

Марка флюса	Составляющие компоненты	Состав, %	Внешний вид	Коррозионное действие (без промывки мест пайки)		Назначение	Способ приготовления
				на алюминий	на медь		
КСп	Канифоль сосновая, ГОСТ 797-64 Спирт этиловый технический (гидролизный, марки „А"), ГОСТ 8314-57	25 75	Жидкость светло-коричневого цвета	Не оказывает	Оказывает	1. Пайка погружением алюминиевых проводов с алюминиевыми и медными, лужение медных проводов 2. Консервация в процессе хранения подлежащих пайке облуженных концов на готовых алюминиевых катушках и медных выводах	Растертую канифоль растворить в спирте и перемешать

необходимо производить в брезентовых рукавицах и защитных очках.

Ниже приводится описание операций при выполнении соединений.

Зачистка концов проводов. С концов алюминиевых проводов удаляют эмалевую изоляцию на длине 65—70 мм, а с концов медных проводов снимают оплетку

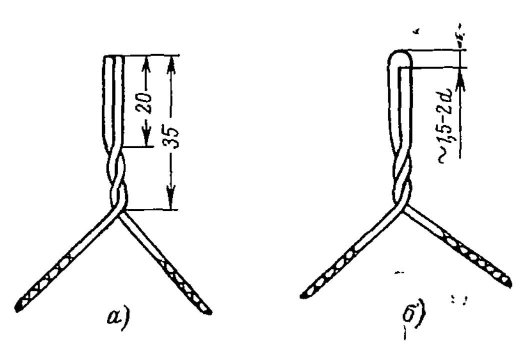


Рис. 38. Межкатушечные соединения при сварке контактным нагревом.
а — после скрутки; *б* — после сварки; *d* — диаметр алюминиевого провода.

и резиновую изоляцию на длине 35—40 мм, после чего зачищают оголенные жилы до металлического блеска.

Удаление эмали с концов алюминиевых проводов диаметром до 1 мм производят ножом, а с проводов диаметром свыше 1 мм — при помощи приспособления, состоящего из вращающихся навстречу друг другу двух проволочных щеток диаметром 250—300 мм и шириной 50—60 мм. Щетки набирают из стальных проволочек диаметром 0,08—0,1 мм таким образом, чтобы длина свободно выступающих из оправки концов была 50—60 мм. Каждую щетку крепят непосредственно на валу электродвигателя мощностью 0,5—0,7 кВт, 3 000 об/мин. Удаление эмали с концов катушек можно производить также путем обжига с последующей зачисткой до металлического блеска. Однако этот способ из-за опасности пережога провода требует соответствующих навыков. Удаление оплетки и резиновой изоляции с концов медных выводов производят ножом, а при большом объеме работ — механической установкой, после чего окончательно зачищают концы проводов стеклянной шкуркой.

Зачищенные концы тщательно протирают бязевым тампоном, смоченным в ацетоне или бензине. Чтобы избежать образования на зачищенных концах провода пленок окисла, затрудняющих последующую операцию — лужение, следует так построить процесс, чтобы перерыв между зачисткой и лужением не превышал 2—3 ч. Следует оберегать зачищенные концы от попадания на них пыли и жира, что также влияет на качество лужения и пайки; для хранения катушек с зачищенными концами рекомендуется пользоваться закрытыми ящиками.

Лужение. Лужению подвергают все зачищенные концы проводов, за исключением алюминиевых, соединяемых сваркой контактным нагревом; лудят концы проводов в металлической переносной ванне емкостью 0,2 л и диаметром зеркала 40—50 мм с наружным электрообогревом, питаемым напряжением 36 В.

Перед лужением концы алюминиевых проводов покрывают флюсом Ф59А, а медных проводов — флюсом КСп. Флюс наносят тонким равномерным слоем окунанием или промазкой мягкой кистью. Концы алюминиевых проводов, предназначенных для соединения способом заливки, допускается лудить без флюса, но только после того, как процесс бесфлюсового лужения будет освоен в такой степени, что это ни в коей мере не будет отражаться на качестве самого соединения. Офлюсованные концы лудят погружением в ванну с расплавленным припоем П250А, подогретым до 310—320 °С или припоем П300А, подогретым до 370—380 °С. Время выдержки концов проводов в припое после прекращения выделения паров и дыма ориентировочно составляет 3—10 с; окончательно устанавливается опытным путем.

После выемки из ванны облуженный конец встряхивают для удаления излишков припоя. Качество лужения проверяют внешним осмотром; облуженная поверхность должна иметь однотонный блеск, быть ровной, без наплывов припоя и темных пятен. Не позже 1—1,5 ч после лужения удаляют остатки флюса Ф59А с облуженных концов промывкой в ванне с проточной водой, подогретой до 60—70 °С при помощи жесткой волосяной щетки в течение 1,5—2 мин с последующей промывкой в холодной проточной воде и протиркой насухо чистым бязевым тампоном. Остатки флюса КСп после лужения удалению не подлежат.

При необходимости перерыва между лужением и пайкой более одного дня концы проводов сразу же после лужения консервируют путем нанесения на них флюса КСп и высушивания полученной пленки на воздухе. Срок хранения после консервации 15 дней. При более длительном сроке хранения необходимы повторная зачистка и повторное лужение концов проводов.

Пайка способом погружения. Для выполнения межкатушечных соединений облуженные концы выправляют и скручивают, как это показано на рис. 36,*а* и *в* (поз. *1* и *5*). Для выполнения выводных соединений алюминиевый провод обматывают вокруг медного (рис. 36,*а* и *в*, поз. *2* и *6*). Выступающие концы проводов обрезают. После скрутки концы проводов покрывают флюсом КСп. Флюс наносят тонким слоем окунанием или промазкой мягкой кистью и погружают в ванну с расплавленным припоем П250А или П300А. Ванна, в которую погружают скрученные офлюсованные концы проводов, аналогична ванне для лужения, но температура нагрева ванны 295—305 °С для припоя П250А и 345—355 °С для припоя П300А. Время выдержки концов проводов в припое после прекращения выделения паров и дыма ориентировочно составляет 5—15 с; окончательно устанавливается опытным путем. Качество пайки проверяют внешним осмотром, при необходимости пользуются лупой с 8—10-кратным увеличением; по линии сопряжения скрученных проводов должна быть равномерная непрерывная галтель из припоя, как это показано на рис. 36,*б* и *г*. Поверхность соединения должна иметь однотонный блеск, без непропаев, пористости, вздутий, наплывов, игл и грубой шероховатости.

Принятое соединение тщательно протирают бязевым тампоном, смоченным спиртом, герметизируют для защиты от коррозии путем покрытия глифталевым лаком ГФ-95 с помощью мягкой кисти и изолируют соединение, как это предусмотрено по конструкции выполнения обмотки.

Пайка способом заливки. Для выполнения межкатушечных и выводных соединений облуженные концы проводов выправляют, выравнивают по торцу и собирают встык в разборной заливочной асбоцементной форме (рис. 39,*а*) так, чтобы стык соединяемых проводов находился против литникового отверстия. Собранные полуформы вставляют в металлический сборник (рис. 39,*б*)

и плотно стягивают болтом. При выполнении пайки обмотки после ее укладки в статор сборники с полумуфтами закрепляют на приспособлении, устанавливаемом на корпусе электродвигателя, и заливают форму расплавленным припоем «Б», разогретым до 700—750 °С, который льют непрерывной струей из металлического пере-

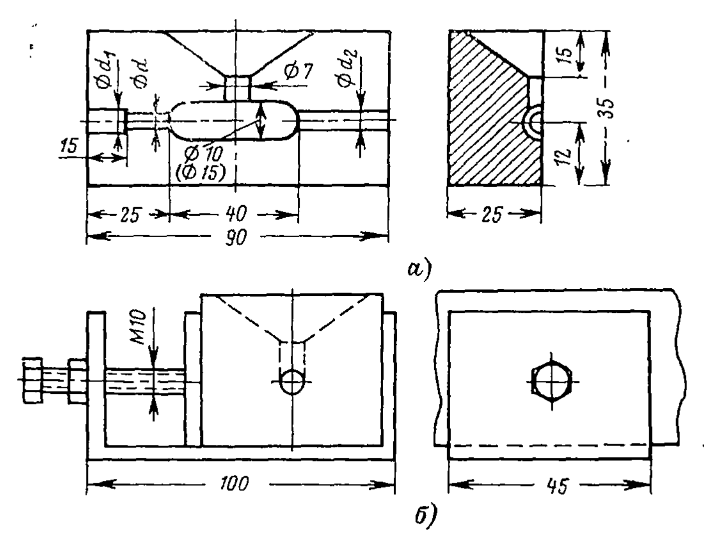


Рис. 39. Приспособления для пайки проводов способом заливки.

а — полуформы; *б* — полуформы, установленные в металлическом сборнике: *d* — диаметр голого медного провода; d_1 — диаметр изолированного медного провода; d_2 — диаметр алюминиевых проводов после скрутки в жгут. Размеры в скобках — для электродвигателей 9-го габарита.

носного разливочного ковша емкостью 0,25—0,3 л с наружным электрообогревом, питаемым напряжением 36 В. После затвердения припоя снимают сборник, разбирают форму, удаляют литник и опиливают место соединения. Пайку проверяют внешним осмотром; на литой оболочке не должно быть трещин, пор и усадочных раковин. Допускаются единичные щелевидные пустоты, если они имеют только продольное расположение и их суммарный размер не превышает 3 мм по ширине и 10 мм по длине. Принятое соединение герметизируют и изолируют так же, как паянное способом погружения.

Сварка способом контактного нагрева. Для сварки проводов необходимы следующие оборудование и инструменты:

трансформатор нагревательный мощностью 3—5 кВ · А со вторичным напряжением 4 и 6 В;

клещи сварочные (рис. 40,*а*) со сменными графитовыми губками (рис. 40,*б*) для подвода тока и зажима соединяемых концов алюминиевых проводов, с гибким

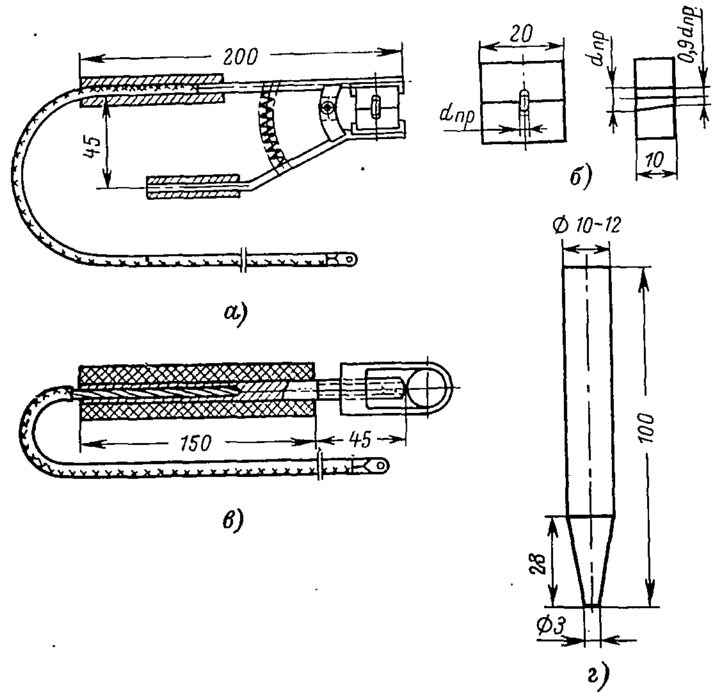


Рис. 40. Приспособления для сварки проводов контактным нагревом.
а — клещи с гибким кабелем; *б* — сменные графитовые губки; *в* — держатель электрода; *г* — графитовый электрод; $d_{пр}$ — диаметр алюминиевого провода.

кабелем сечением 25 мм², длиной 2—3 м, для присоединения к трансформатору;

держатель графитового электрода (рис. 40,*в*) с электродом (рис. 40,*г*) и гибким кабелем сечением 25 мм², длиной 2—3 м, для присоединения к трансформатору.

Для соединения зачищенные концы алюминиевых проводов выправляют, скручивают, как это показано на рис. 38,*а*; и устанавливают в сварочных клещах так, чтобы торцы проволок выступали над поверхностью графитовых губок на 1,5—2,0 мм. После включения нагревательного трансформатора следует замыканием электрода

о поверхность графитовых губок разогреть их и затем замкнуть электрод на торцы выступающих концов проволок и так держать до их оплавления и сварки. Вторичное напряжение нагревательного трансформатора нужно установить путем пробной сварки нескольких образцов проволоки аналогичного диаметра. После сварки соединение зачищают проволочной щеткой.

Соединение проверяют внешним осмотром; длина участка соединения должна быть не менее 1,5—2,0 диаметров проволоки. На боковых поверхностях проволок не должно быть надрывов, раковин и следов пережога. Принятое соединение изолируют, как это предусмотрено по конструкции выполнения обмотки.

Пропитка обмоток. Для пропитки обмоток, ремонтируемых с применением алюминиевого обмоточного провода марки ПЭВА-2 или ПЭЛРА-2, наибольшее распространение получил лак МЛ-92 (бывший МГМ-16), представляющий собой смесь алкидного лака ГФ-95 и меламиноформальдегидной смолы в растворе бутанола, а для наружного покрытия обмоток — глифталемасляные эмали воздушной сушки марок ГФ-92ХС (серого цвета), ГФ-92ХК (красного цвета) или печной сушки марки ГФ-92ГС (серого цвета).

При нормальном исполнении электродвигателя (по отношению к воздействию окружающей среды) применяют две пропитки лаком и одно покрытие эмалью. При химостойком и влагостойком исполнении количество пропиток лаком увеличивается до трех и покрытий эмалью до двух. Вместо лака МЛ-92 для пропитки обмоток можно применять лак марки МГМ-8, представляющий собой смесь лака ГФ-95 и меламиноформальдегидной смолы К-421-02 в весовых частях 92 и 8 или лаков ГФ-95 и МЛ-92 в равных весовых частях, однако предпочтение следует отдать лаку МЛ-92.

Вязкость указанных лаков должна составлять при 20 °С 15—35 с по вискозиметру ВЗ-4; разбавителями лаков является ксилол или толуол.

Рекомендуются следующие режимы сушки и пропитки обмоток из алюминиевого провода при применении лака МЛ-92 (табл. 34).

Качество пропитки и сушки обмотки проверяют внешним осмотром и измерением величины сопротивления изоляции. Обмотка не должна иметь пропусков — мест, не заполненных лаком, и не должно быть отлипа лака.

Таблица 34

Операция	Режим	
	Температура, °С	Время, ч
Предварительная сушка	125±5	3—4
Первая пропитка	—	0,25
Стекание лака	—	0,25
Выдержка на воздухе	—	1
Первая сушка	125±5	8
Вторая пропитка	—	0,2
Стекание лака	—	0,25
Выдержка на воздухе	—	1
Вторая сушка	125±5	12
Третья пропитка	—	0,1
Стекание лака	—	0,25
Выдержка на воздухе	—	1
Третья сушка	125±5	16

Примечание. Для лака МГМ-8 температура сушки увеличивается до 135±5°С.

Величина сопротивления изоляции обмоток по отношению к корпусу электродвигателя и между обмотками должна быть не менее 1 мОм при температуре 95—100 °С.

Вязкость эмалей ГФ-92ХС, ГФ-92ХК и ГФ-92ГС должна составлять при 20 °С 20—35 с по вискозиметру ВЗ-4; разбавителем является ксилол.

Температура сушки после покрытия эмалью воздушной сушки — 20 °С в течение 24 ч, печной сушки — 110±±5 °С в течение 2,5—3 ч.

Покрытие эмалью рекомендуется производить с помощью краскораспылителя тонким ровным слоем до получения гладкой и блестящей поверхности. После сушки пленка эмали должна быть твердой, без морщин, трещин и пропусков (не покрытых эмалью мест).

Следует отметить, что впредь до выпуска нашей промышленностью в массовом порядке алюминиевых обмоточных проводов с более теплостойкой изоляцией существующий класс нагревостойкости алюминиевых обмоток статора ограничивается классом Е; этому классу соответствуют выпускаемые алюминиевые провода марок ПЭВА-2 и ПЭЛРА-2. С выпуском алюминиевых проводов с более теплостойкой изоляцией класс нагревостойкости обмоток может быть сразу же повышен; выпускаемые нашей промышленностью электроизоляционные

материалы для пазовой изоляции, а также пропиточные лаки и покровные эмали уже в настоящее время в состоянии обеспечить более высокие классы нагревостойкости обмоток вплоть до класса Н.

2-4. ПРИЕМО-СДАТОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В соответствии с техническими условиями отремонтированные электродвигатели подвергаются приемо-сдаточным испытаниям.

После капитального ремонта, если не были изменены мощность или скорость вращения электродвигателя, производятся контрольные испытания; при ремонте, связанном с изменением указанных параметров, электродвигатель подвергают более полным, типовым испытаниям.

Объем испытаний определяется ГОСТ 183-66 и техническими условиями ТУ 16-519.002-71.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баинов С. Е. Ремонт электрооборудования металлургических заводов. М., Металлургиздат, 1957.
2. Виноградов Н. В. Обмотка электрических машин. М., «Высшая школа», 1969.
3. Готман П. Е., Березин В. Б., Хайкин А. М. Электротехнические материалы. Справочник. М., «Энергия», 1969.
4. Жерве Г. К. Расчет асинхронного двигателя при ремонте. М., «Энергия», 1967.
5. Зимин В. И. и др. Обмотки электрических машин. М., «Энергия», 1970.
6. Маршак Е. Л. Ремонт и модернизация асинхронных двигателей. М., «Энергия», 1970.
7. Нормаль электротехники. Электродвигатели трехфазные асинхронные мощностью от 0,6 до 100 кВт. Выполнение соединений алюминиевых проводов между собой и с медными проводами. Информстандартэлектро, 1967.
8. Обмоточные данные асинхронных двигателей. Конструкторско-технологическое бюро «Электропромремонта», под ред. П. И. Цибулевского. М., «Энергия», 1966.
9. Организация и технология ремонта электрических машин. Московский дом научно-технической пропаганды, 1959.
10. Слоним Н. М. Применение алюминиевых проводов при ремонте электродвигателей. ГОСИНТИ «Союзсельхозтехника», 1962.
11. Слоним Н. М. Испытание асинхронных двигателей при ремонте. М., «Энергия», 1970.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Цена 35 коп.